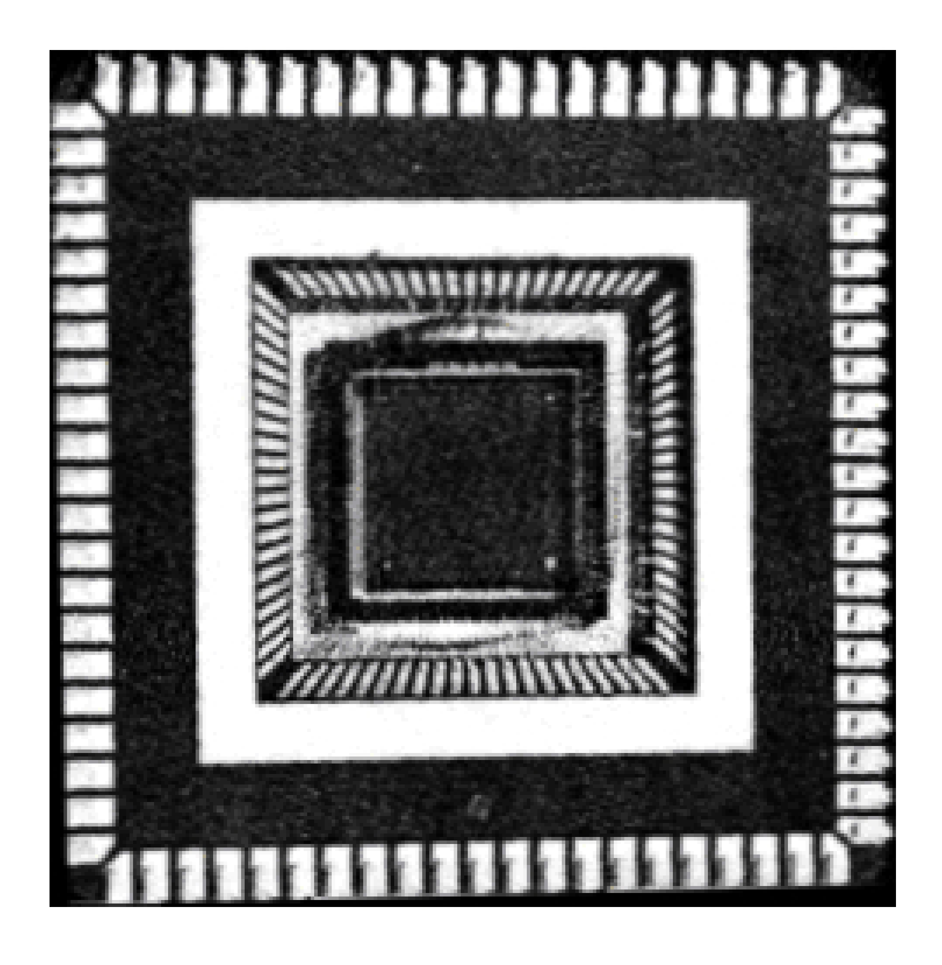
М.Г. Томилин, Г.Е. Невская

ДИСПЛЕИ НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2010

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

М.Г. Томилин, Г.Е. Невская

ДИСПЛЕИ НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2010

Томилин М.Г., Невская Г.Е. Дисплеи на жидких кристаллах

– СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 108 с.

Описаны современные дисплейные технологии, дан анализ систем отображения информации и основных этапов развития жидкокристаллических дисплеев. Рассмотрены различные типы дисплеев на жидких кристаллах: просветные и отражательные дисплеи прямого видения; проекционные; дисплеи на эластичной подложке. Обсуждены дисплеи для отображения 3-х мерных объектов: дисплеи реального трехмерного изображения; стереоскопические, автостереоскопические, голографические и ретинальные дисплеи. Приведены их основные характеристики: контрастное отношение, углы обзора, времена переключения. Рассмотрены перспективы развития дисплеев на жидких кристаллах.

Учебное пособие адресовано специалистам в области информационных технологий, студентам и аспирантам, обучающихся в области приборостроения, оптики и фотоники.

Рекомендовано к печати ученым советом естественнонаучного факультета, протокол № 8 от 01 июня 2010 г.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ

Значительным достижением последних десятилетий является применение жидких кристаллов в современных оптических технологиях. Жидкие кристаллы (ЖК) обладают необычными, а в ряде случаев уникальными свойствами по сравнению с традиционными оптическими материалами – возможностью плавного и локального управления оптическими характеристиками среды: светопропусканием, светорассеянием, поляризацией, преломлением, отражением, поглощением света, цветовыми параметрами. Это управление можно осуществлять электрическими, световыми сигналами, механическими, тепловыми, магнитными и даже химическими воздействиями. ЖК используются как в оптических элементах, составивших новую элементную базу, так и в оптических системах с новыми функциональными возможностями. Следует выделить три основные области применения ЖК материалов: дисплеи, оптические устройства и регистрирующие среды.

Цель настоящего учебного пособия состоит в описании дисплейных применений ЖК. Дисплеи на ЖК обладают конструктивным многообразием, выпускаются миллионными тиражами, используются во множестве приборов и широко вошли в нашу повседневную жизнь. Основной областью их применения стали плоские экраны мониторов персональных компьютеров, телевизоров и мобильных телефонов.

В работе кратко рассмотрены общие сведения о ЖК и электрооптических эффектах в них, необходимые для понимания дисплейных применений; общие сведения о дисплеях и развитии дисплейных технологий; различные типы плоских жидкокристаллических дисплеев, а также дисплеи для отображения 3-х мерных объектов.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

1.1. Структура жидких кристаллов

Жидкокристаллическим (ЖК) (или *мезоморфным*) называют состояние вещества, промежуточное между твердым кристаллом и изотропной жидкостью. В твердом кристалле существует дальний порядок в расположении молекул и они, участвуя в тепловом движении, как правило, не покидают положения своего равновесия. В изотропных жидкостях отсутствует дальний порядок, и молекулы обладают высокой подвижностью. В жидкокристаллическом состоянии вещество по своим реологическим свойствам подобно жидкости – оно текуче, образует капли, принимает форму сосуда, в котором находится. Вместе с тем, как твердый кристалл, оно имеет

анизотропию оптических, электрических, магнитных, механических и других свойств, что является следствием наличия определенного порядка в расположении молекул. Жидкокристаллическое состояние свойственно многим органическим (и ряду неорганических) соединениям, молекулы которых анизометричны, что определяет наличие порядка в их расположении. Различают низкомолекулярные ЖК и полимерные ЖК. Низкомолекулярные ЖК (длина молекул 10-15 Å), характеризуются более высокой подвижностью молекул. Низкомолекулярные ЖК разделяют на *термотропные* и *лиотропные*. Термотропные ЖК существуют в некотором температурном интервале. Фазовые переходы в этих веществах происходят при изменении температуры. Твердый кристалл (К) переходит в жидкокристаллическую фазу при температуре плавления $T_{пл}$. Дальнейшее нагревание приводит к переходу в изотропную жидкость (ИЖ) при температуре просветления $T_{пр}$. Типичная схема фазовых переходов имеет вид:

$$К \overset{T_{пл.}}{\leftrightarrow} ЖК \overset{T_{пр.}}{\leftrightarrow} ИЖ$$

Лиотропные ЖК образуют мезофазу только в растворе при определенных значениях концентрации, температуре и давлении. Обычно они состоят из поверхностно активных веществ (амфифильных молекул). Лиотропные мезофазы образуются при растворении поверхностно активных веществ (ПАВ) в воде или некоторых других растворителях.

В прикладной оптике используются преимущественно термотропные ЖК, причем практический интерес представляют два типа. Они имеют или удлиненную форму и называются *каламитиками*, или дискотическую и называются *дискотиками* (рис.1.). Первые при вращении молекул вокруг длинной оси образуют цилиндр с достаточно большим отношением высоты к диаметру.

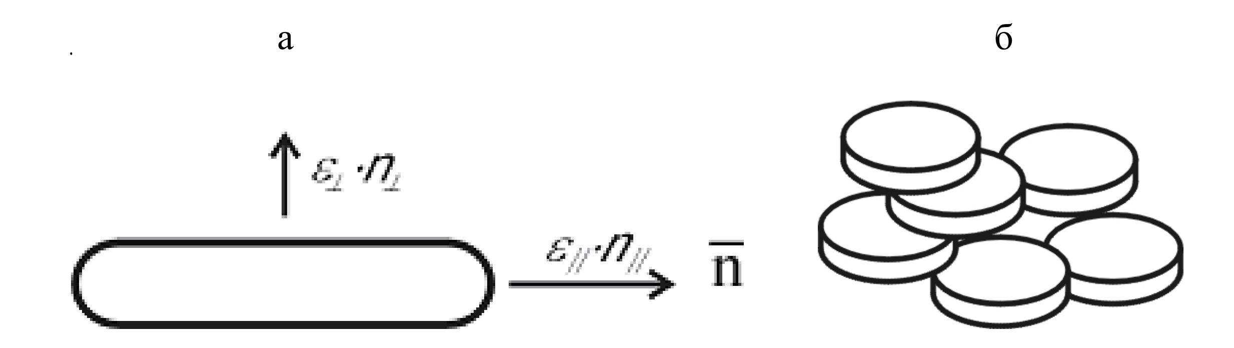


Рис.1. Схематическое изображение палочкообразных молекул ЖК или каламитиков (а) и дискотиков (б): ***n*** – преимущественное направление длинных осей молекул, *ε* – диэлектрическая проницаемость, *n* – показатель преломления ЖК.

1.2. Классификация жидких кристаллов

Различные структуры ЖК имеют разную упорядоченность в расположении молекул. Для характеристики упорядоченности в мезофазах вводится единичный вектор ***n*****,** указывающий направление преимущественной ориентации длинных осей молекул. Его принято называть директором. Направления +***n*** и –***n*** являются произвольными. Директор характеризует дальний порядок в расположении молекул, поэтому ЖК можно классифицировать в зависимости от ориентации директора и расположения центров масс молекул. Термотропные ЖК разделяют на нематические (нематики), холестерические (холестерики) и смектические (смектики) **(**рис. 2).

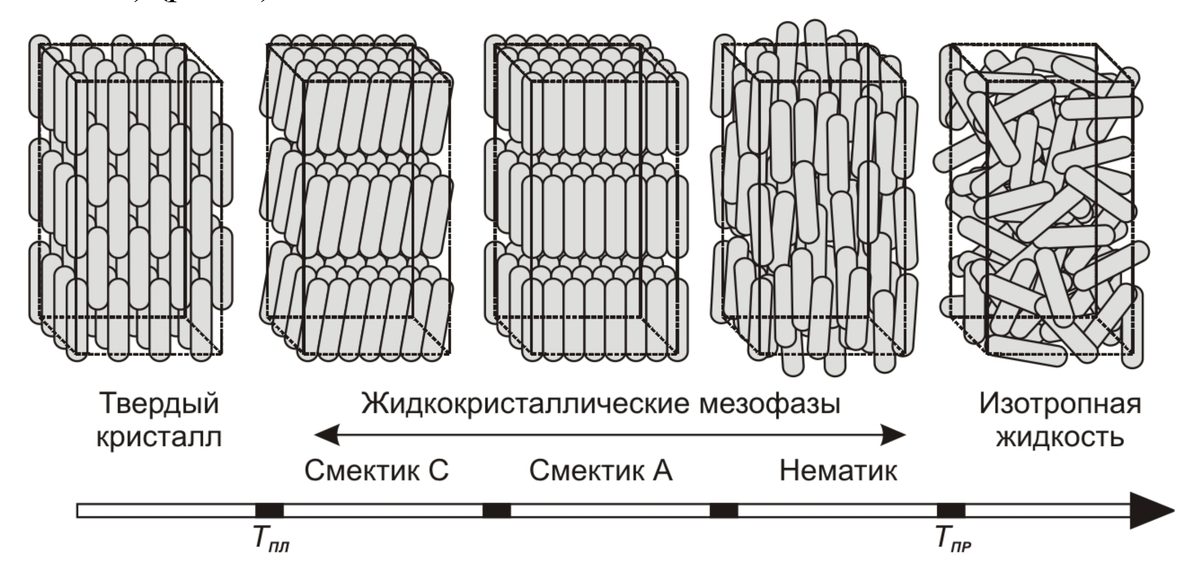


Рис. 2. Фазовые переходы в термотропных ЖК, происходящие при нагревании образца

Нематики (от греческого слова *нема* – нить) имеют дальний ориентационный порядок: молекулы нематического жидкого кристалла (НЖК) длинными осями ориентированы приблизительно параллельно друг другу, но их центры масс расположены хаотично. При сохранении направления директора в них возможно вращение молекул вокруг длинных и коротких осей. Примерами нематиков, существующих при комнатной температуре, являются хорошо изученные соединения метоксибензилиден–*n*-бутиланилина (МББА) и 4-н-пентил-4'-цианобифенила (5ЦБ). Холестерические ЖК (ХЖК) – названы так потому, что к ним относятся главным образом производные холестерина. Холестерическая фаза образована оптически активными молекулами. В каждом слое длинные оси молекул ориентированы параллельно, как в одноосном нематике, но при переходе от одного слоя к следующему, директор поворачивается на небольшой угол, поскольку молекулы холестерика зеркально асимметричны. Как следствие, структура имеет винтовую ось симметрии, расположенную нормально к директору (рис.3).

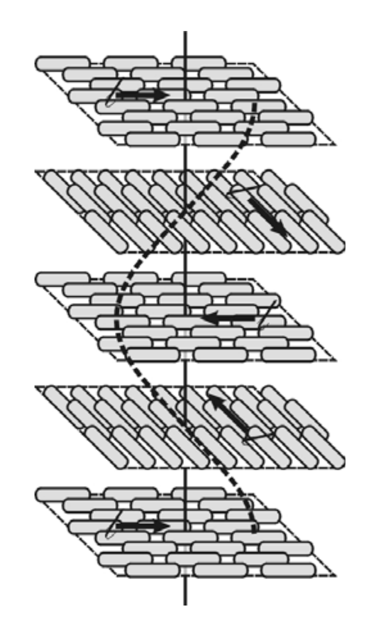


Рис. 3. Спираль ХЖК

Расстояние между двумя соседними слоями с одинаковой ориентацией молекул называется шагом спирали. Таким образом, в ХЖК наблюдается одномерный ориентационный порядок с одномерным трансляционным упорядочением. Холестерическую фазу можно получить при добавлении небольшого количества производного холестерина или немезоморфного оптически активного вещества в нематик: такую смесь называют хиральным нематиком. Спиральная упаковка молекул ХЖК является причиной ее уникальных оптических свойств – селективного отражения циркулярно поляризованного света и высокой оптической активности. Для некоторых веществ удельное вращение плоскости поляризации достигает 60000-70000 град/мм, в то время как для обычных органических жидкостей и оптически активных кристаллов этот параметр редко превышает 300 град/мм. Шаг холестерической спирали зависит от температуры. Если шаг ХЖК не превышает длины волн видимой части спектра, то могут быть получены характерные цвета. Поэтому ХЖК нашли применение как регистрирующие среды в термографии для визуализации распределения температурных полей на поверхностях различных материалов и объектов.

Смектические ЖК (СЖК) – от греческого слова *смегма* (мыло) – образуют наиболее упорядоченные мезофазы: длинные оси молекул ориентированы приблизительно параллельно друг другу, и их центры масс располагаются в пределах одного слоя. СЖК обладают частичным как ориентационным, так и дальним трансляционным порядком. Толщина слоев в СЖК фазах порядка длины молекулы (20-40 Å). Возможны различные типы упаковок молекул в слое. Смектические фазы обозначают прописными буквами латинского алфавита. Различают смектики A, B, C, H, I. B.

При нагревании ЖК из твердой кристаллической фазы могут последовательно наблюдаться фазовые переходы. Если вещество обладает нематической и смектической фазой, то температура смектической фазы, обыч-

но, ниже, чем нематической. При нагревании и охлаждении такого вещества фазовые переходы происходят по схеме:

$$К \leftrightarrow СЖК \leftrightarrow НЖК \leftrightarrow ИЖ$$

В веществах, молекулы которых оптически активны, фазовые переходы осуществляются по схеме:

$$К \leftrightarrow СЖК \leftrightarrow ХЖК \leftrightarrow ИЖ$$

Существуют хиральные смектики, обозначаемые индексом (*): в смектиках A* закручивание происходит в плоскости слоев, а в смектиках C* – перпендикулярно плоскости слоев (рис.4). Смектик C* формируется отдельными хиральными компонентами или их смесью. Локально структура хирального смектика C* такая же, как и ахирального смектика C, при этом слои закручены относительно оси, перпендикулярной плоскости слоев. Смектик C* является сегнетоэлектрическим смектиком.

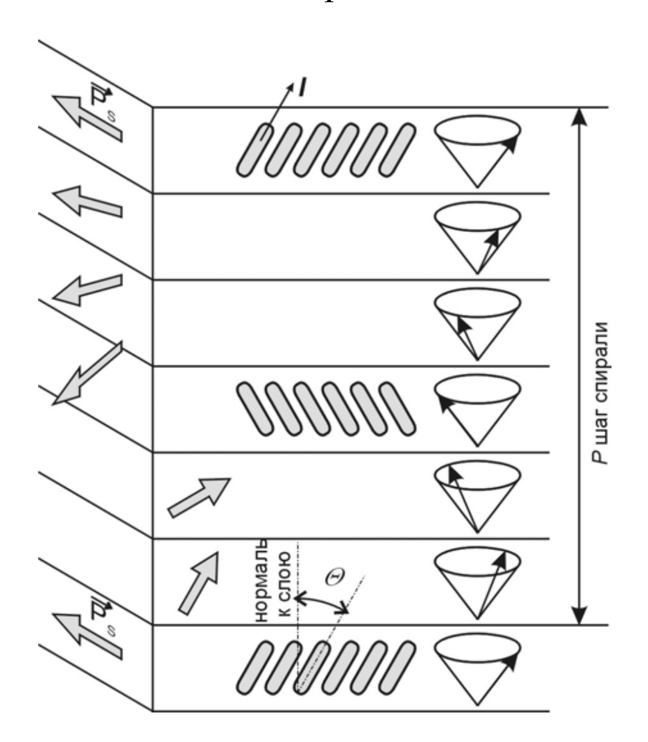


Рис.4. Схематическое изображение фазы C*ЖК

Особыми формами конденсированного состояния обладают полимеры – системы достаточно гибких макромолекул, состоящих из большого числа звеньев. Ориентационно упорядоченными структурными элементами в них являются относительно жесткие анизометричные мезогенные группы в основной или боковых цепях (гребнеобразные полимеры). Они соединены с основной цепью гибкими развязками (рис.5), или условно выделяемыми участками цепи с персистентным механизмом гибкости.

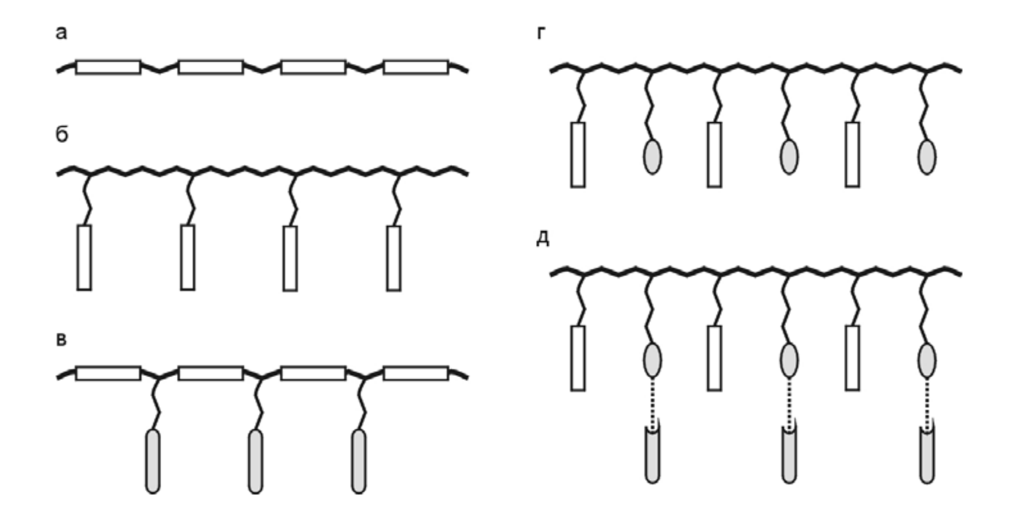


Рис.5. Структуры высокомолекулярных ЖК: а – линейные полимеры, б – гребнеобразные полимеры с мезогенными группами в боковых цепях, в – гребнеобразные полимеры с мезогенными группами в основной и боковых цепях, г – гребнеобразные сополимеры с мезогенными и функциональными группами в боковых цепях, д – смеси таких сополимеров с низкомолекулярными и немезогенными соединениями.

Отдельный класс материалов составляют ЖК композиты. По структуре они чрезвычайно многообразны. Среди них следует выделить НЖК, ХЖК и СЖК, диспергированные в полимерной матрице. Физические свойства ЖК композитов существенно отличаются от свойств входящих в них ЖК. Это открывает новые возможности в применении.

1.3. Основные физические свойства жидких кристаллов

В этом разделе будут приведены только те физические свойства, которые определяют электрооптические эффекты, являющиеся основой большинства применений жидких кристаллов.

Оптические свойства

Оптические свойства ЖК материалов (ЖКМ) определяют эксплуатационные параметры оптических элементов на их основе. От оптической анизотропии НЖК зависят контраст и углы наблюдения в дисплеях. Особенностью ЖКМ является наличие большого двулучепреломления, дихроизма и оптической активности. ЖК могут быть как оптически одноосными так и двуосными. В одноосных ЖК свет, поляризованный в двух взаимно перпендикулярных направлениях, распространяется с разной скоростью. Нематики являются, как правило, оптически положительными, т.е. для них показатель преломления необыкновенного луча (n_e) больше или равен показателю преломления обыкновенного луча (n_o). Для них оптическая анизотропия $\Delta n = (n_e - n_o) \geq 0$. ХЖК ведут себя как оптически отрицательный одноосный кристалл (Δn

≤ 0). Характерные значения показателей преломления нематиков и смектиков для видимой области спектра лежат в пределах от 1,4 до 1,9. Величина двулучепреломления $\Delta n = n_e - n_o$ в зависимости от типа НЖК может изменяться в широких пределах от 0,02 до 0,5. С уменьшением λ величины показателей преломления и Δn возрастают. С увеличением λ значения Δn постепенно уменьшаются и становятся практически постоянными в области ИК диапазона за исключением отдельных локальных пиков поглощения.

Двулучепреломление ЖК уменьшается с ростом температуры, стремясь к нулю при приближении к температуре просветления. На рис. 6 приведена зависимость Δn от температуры для ряда соединений.

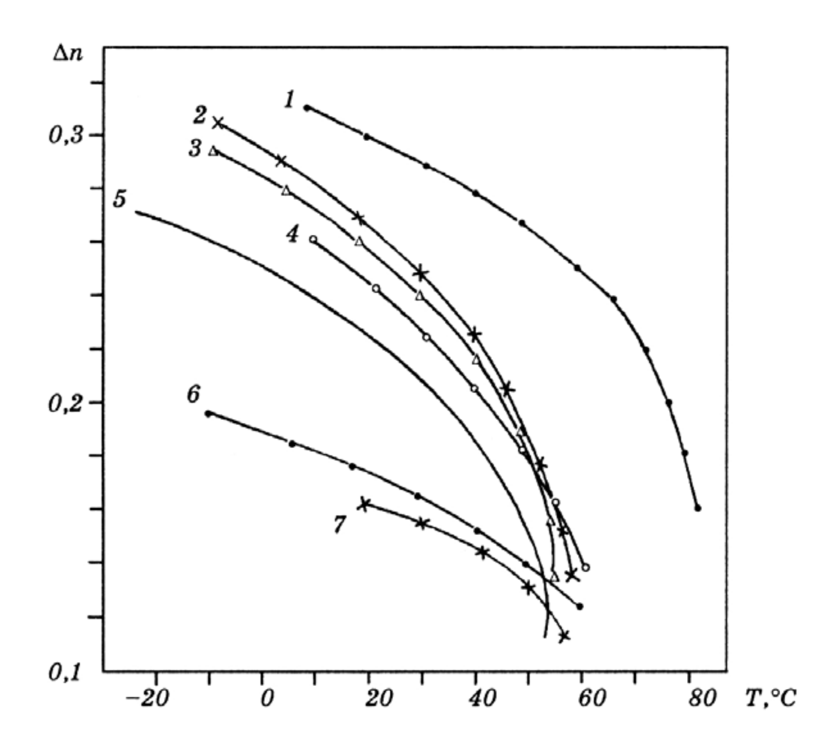


Рис 6. Зависимость оптической анизотропии Δn от температуры T для НЖК различных структур: 1 – салицилиденанилины; 2 - азоксисоединения; 3 – основания Шиффа; 4 – толаны; 5 – бифенилы; 6 – циклогексаны; 7 – сложные эфиры

Поглощение света в ЖК в видимом диапазоне длин волн обычно мало. Однако в ряде проекционных и бесполяроидных дисплеев для автономных переносных устройств его необходимо учитывать, если оно зависит от мощности источника излучения или условий эксплуатации. Основное поглощение ЖК компонентами наблюдается в двух диапазонах: УФ и ИК. В проекционных дисплеях с мощными осветительными лампами эти диапазоны спектра необходимо отфильтровывать. Под воздействием УФ излучения ЖКМ может разлагаться, уменьшая долговечность устройства. Поглощенный свет может нагревать ЖК элемент. Поскольку Δn, вязкость и

упругие константы зависят от температуры, характеристики ЖК элемента также будут изменяться. Влияние УФ излучения на фотостабильность и долговечность ЖК связано с разрушением химических связей длинной молекулярной цепи и нарушением условий ориентации, что ухудшает параметры ЖК элементов.

Оптические свойства холестериков имеют ряд особенностей, являющихся следствие наличия спиральной структуры. Они оптически одноосны, имеют отрицательную оптическую анизотропию, обладают большой оптической активностью, круговым дихроизмом и селективным отражением света. Возникновение окраски слоя ХЖК при его освещении белым светом можно объяснить, если представить его как дифракционную решетку с системой параллельных слоев толщиной *p/2* и средним показателем преломления *n*. Тогда длина волны света λ_0, имеющего при интерференции максимальную интенсивность, будет подчиняться условию Вульфа-Брегга:

$$\lambda_o = 2\bar{n} \cdot d \cdot Sin\Theta \qquad (1)$$

где $d = p/2$ – период решетки; θ – угол между падающим лучом и холестерической плоскостью, $\bar{n}$ - средний показатель преломления. В случае нормального падения, когда $\theta = 90^o$,

$$\lambda_o = \bar{n} \cdot p \qquad (2)$$

При нормальном падении света слой холестерика селективно отражает свет с длиной волны, равной шагу спирали. Синтезировано много ХЖК с шагом $p \approx 400\text{-}1000$ нм. Для них λ_0 лежит в видимой области. Селективное отражение в окрестности λ_0 означает, что освещенная белым светом плоская структура ХЖК будет окрашена в цвет, соответствующий λ_0. Температурная зависимость шага спирали ХЖК является его важнейшей характеристикой. Изменение шага спирали (или цвета) является основой для применения холестериков. У большинства эфиров холестерина шаг спирали уменьшается с ростом температуры ($dp/dt < 0$). В немато-холестерических смесях можно наблюдать все три типа зависимости $p(t)$: $dp/dt > 0$; $dp/dt < 0$; $dp/dt = 0$.

Электрические свойства

Чистые органические жидкокристаллические соединения являются диэлектриками. Они обладают диэлектрической анизотропией $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{II} - \varepsilon_{\perp}$, где ε_{II} и $\varepsilon_{\perp}$ - диэлектрические проницаемости в направлении параллельном и перпендикулярном направлению преимущественной ориентации. Величина и знак $\Delta\varepsilon$ зависят от электронной структуры молекул, частоты элек-

трического поля и температуры. Отрицательная величина $\Delta\varepsilon$ обусловлена наличием в молекулах ЖК дипольных моментов, направленных под большим углом к длинным осям молекул (> 55°), а положительная величина $\Delta\varepsilon$ связана с наличием дипольных моментов, направленных почти по оси наибольшей поляризуемости молекул (< 55°). Диэлектрические проницаемости ε_{II} и $\varepsilon_{\perp}$ испытывают дисперсию, причем дисперсия ε_{II} происходит при более высоких частотах. Имеются ЖК соединения, у которых с изменением частоты происходит смена знака $\Delta\varepsilon$ (рис. 7).

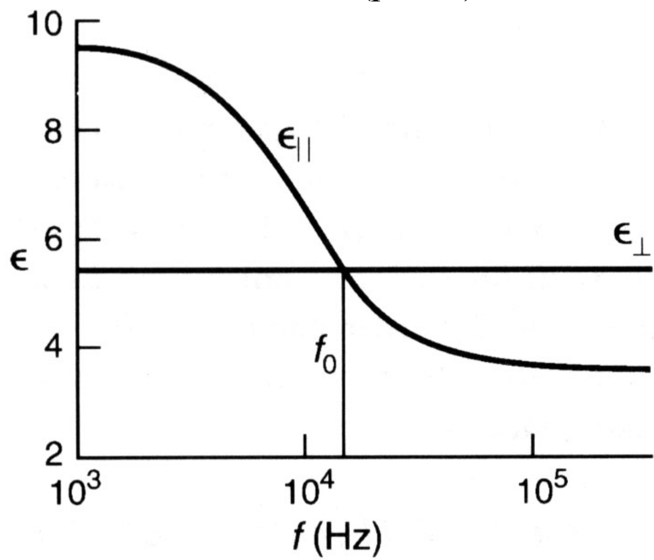


Рис. 7. Смена знака $\Delta\varepsilon$ в смеси фенилбензоатов, f_o – частота инверсии знака $\Delta\varepsilon$.

Изменение знака $\Delta\varepsilon$ имеет важное практическое значение. Это позволяет уменьшить времена релаксации ориентационного электрооптического эффекта, поскольку в этом случае молекулы ЖК возвращаются к исходному положению не только под действием сил упругости, но и электрического поля.

ЖК являются диэлектриками, электропроводность которых можно изменять. Собственная удельная электропроводность чистых НЖК имеет величину порядка $1\cdot10^{-13}$ Ом$^{-1}$см$^{-1}$. Механизм электропроводности в ЖК – ионный, причем по своей природе носители заряда могут быть как собственными, так и примесными. Ионы могут образовываться в результате диссоциации в объеме образца и в процессе электрохимических явлений на электродах. Величину электропроводности можно менять, добавляя в него токопроводящие добавки. Электропроводность в ЖК носит анизотропный характер: $\Delta\sigma = \sigma_{II} - \sigma_{\perp}$ (σ_{II} - электропроводность, измеренная вдоль направления длинных осей молекул, а $\sigma_{\perp}$ - перпендикулярно ему). Анизотропия электропроводности определяется не столько химической структурой ЖКМ, сколько анизотропией подвижности носителей заряда. Для большинства нематиков $\Delta\sigma > 0$ и не зависит от анизотропии диэлектрической проницаемо-

сти. В смектиках $\Delta\sigma < 0$, причем величина анизотропии существенно больше, чем в нематической фазе. Проводимость жидкокристаллических материалов оказывает существенное влияние на их долговечность и стабильность.

Следует отметить, что для различных применений предъявляются разные требования к электрических свойствам ЖКМ. Так, для твистовых ЖК дисплеев на тонкопленочных транзисторах требование обеспечения высокого сопротивления важнее, чем обеспечение большой диэлектрической анизотропии. В то же время для супертвистовых дисплеев на НЖК и для дисплеев на ХЖК высокая диэлектрическая анизотропия эффективнее уменьшает управляющее напряжение, чем высокое сопротивление.

Упругие свойства

Важнейшими свойствами ЖК, определяющими их поведение во внешних полях, являются их упругость. Они влияют на такие характеристики, как управляющее напряжение, крутизна вольт-контрастной характеристики, время отклика и другие параметры.

Основная разница между деформациями ЖК и твердых тел заключается в том, что в отличие от твердого тела изменение расстояния между молекулами (неоднородное растяжение или сжатие) не меняет упругую энергию. Деформации сжатия–растяжения очень малы, а деформация сдвига приводит к течению. Поэтому в ЖК наиболее ярко проявляются деформации изгиба поля директора. После снятия внешнего воздействия директор возвращается к исходному равновесному положению под действием упругих сил. Другой особенностью ЖК является их упругость, связанная с локальным изменением ориентации директора. Различают три основных типа деформации в ЖК: поперечный изгиб (рис. 8а) –*splay* (*S*-деформация); кручение (рис. 8б) – *twist* (*T* – деформация), продольный изгиб (рис. 8в) – *bend* (*B* = деформация**)**.

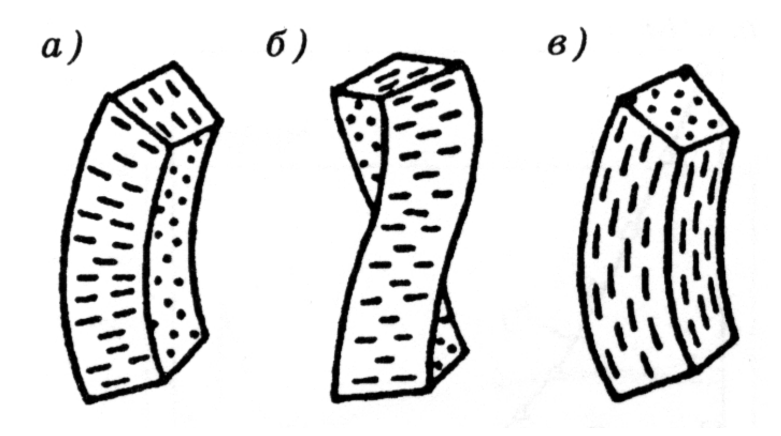


Рис. 8. Основные изгибовые деформации ЖК: а) поперечный изгиб; б) кручение; в) продольный изгиб.

Плотность свободной энергии, связанной с изгибными деформациями, F_d определяется структурой ЖК. Для нематиков F_d описывается уравнением:

$$F_d = ½[k_{11} (div\, \boldsymbol{n})^2 + k_{22} (\boldsymbol{n}\, rot\, \boldsymbol{n})^2 + k_{33} (\boldsymbol{n} \times rot\, \boldsymbol{n})^2, \qquad (3)$$

где $к_{11}, к_{22}, к_{33}$ – константы упругости поперечного изгиба, кручения и продольного изгиба, $\boldsymbol{n}$ – директор НЖК.

Значения констант упругости имеют порядок 10^{-11} Н. Во всех случаях $к_{22}$ меньше $к_{11}$ *и* $к_{33}$. Равновесная структура распределения директора $\boldsymbol{n}$ существенно зависит от отношения констант упругости $к_{33}/к_{11}$, которое фактически определяет оптические и электрические свойства слоев НЖК. Типичные значения отношений $к_{33}/к_{11}$ и $к_{22}/к_{11}$ лежат в пределах: $0.5 < к_{33}/к_{11} < 3,0$; $0.5 < к_{22}/к_{11} < 0,8$. С увеличением температуры все модули упругости уменьшаются. Чувствительность слоя НЖК к внешним воздействиям повышается при уменьшении его модулей упругости. Именно этим сильным изменением локального поля директора при слабом внешнем воздействии, сопровождаемым сильным изменением оптических свойств НЖК слоя, объясняется основная причина эффективного применения НЖК в оптических эффектах.

2. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

В данной главе будут рассмотрены только те электрооптические эффекты, которые лежат в основе создания различных дисплеев.

2.1 Ориентационные (поляризационные) эффекты в нематиках

При приложении электрического поля к слою НЖК плотность свободной энергии равна $F = F_d + F_e$,где F_d - плотность свободной энергии, связанной с изгибными деформациями, F_e – плотность свободной энергии НЖК в электрическом поле. Директор **n** в электрическом поле переориентируется вследствие наличия вращающего момента, пропорционального диэлектрической анизотропии $\Delta\varepsilon$ и вектору поляризации $\boldsymbol{P}$. Это дает соответствующий вклад в плотность свободной энергии ЖК :

$$F_e = F_E + F_f,$$

где

$$F_E = -\, \boldsymbol{DE}/8\pi = -\, \varepsilon_\perp E^2/8\pi - \Delta\varepsilon\, (\boldsymbol{E}\, \boldsymbol{n})^2/8\pi \qquad (4)$$

$$F_f = -\, (\boldsymbol{P}\, \boldsymbol{E}) \qquad (5),$$

В основе анализа всех ориентационных эффектов лежит утверждение: распределение директора **n** должно соответствовать минимуму свободной энергии при заданных граничных условиях.

В большинстве случаев для исследования электрооптических эффектов используются ячейки сэндвичего типа (рис.9). Плоский капилляр толщиной от 5 до 100мкм образован двумя стеклянными пластинами с прозрачными электродами. Зазор фиксирован с помощью изолирующих прокладок. В данной конструкции свет проходит вдоль направления электрического поля.

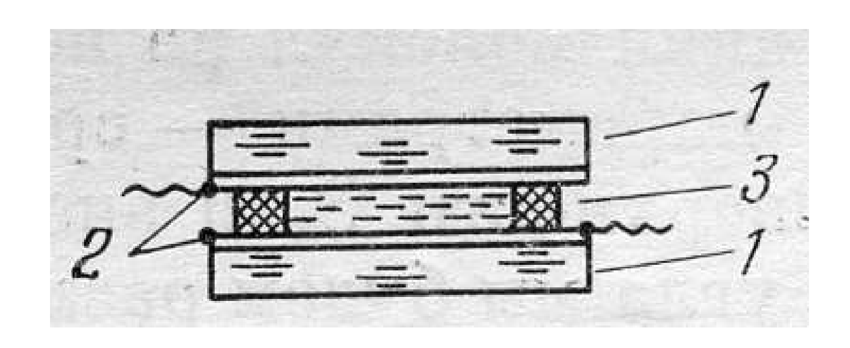


Рис.9. Конфигурация электрооптической ячейки сэндвичего типа: 1 – стеклянные подложки,2 – прозрачные электроды, 3 – диэлектрические прокладки.

Переход Фредерикса

Если в исходном состоянии направления поля и директора НЖК не соответствуют условию минимума свободной энергии, то в электрическом поле, способном преодолеть силы упругости, произойдет переориентация и установится его новое стационарное распределение. Этот эффект был открыт и исследован Фредериксом. Первоначальная ориентация директора является гомогенной ($E \perp n$) для S перехода Фредерикса (S-эффект) и гомеотропной (**E** параллельно **n)** для B-эффекта (рис.10а, б). Диэлектрическая анизотропия НЖК в случае S-эффекта положительная, для B-эффекта – отрицательная. Из условия минимума свободной энергии было найдено распределение директора в слое ЖК в случае S- и B-эффектов.

Результаты расчета распределения директора по толщине ячейки представлены на рис.10 (справа). Показано, что при жестком сцеплении НЖК с подложкой переориентация директора в электрическом поле возможна только при достижении порогового значения напряженности ($E_п$), определяемого следующим выражением:

$$E_n = \frac{\pi}{d}\sqrt{\frac{4\pi K}{\Delta\varepsilon}} \qquad (6)$$

Формула (6) позволяет рассчитать пороговое поле для S-эффекта при $K = K_{11}$, и пороговое поле для B-эффекта при $K = K_{33}$. При S- и B-деформациях происходит изменение двулучепреломления ЖК слоя, так как оно одно-

значно связано с распределением показателя преломления необыкновенного луча $n_e(z)$:

$$n_e = \frac{n_\perp n_{//}}{\sqrt{n_\perp^2 \cos^2\theta(z) + n_{//}^2 \sin^2\theta(z)}} \qquad (7),$$

где $n_{//}$ и $n_\perp$ - главные значения показателей преломления.

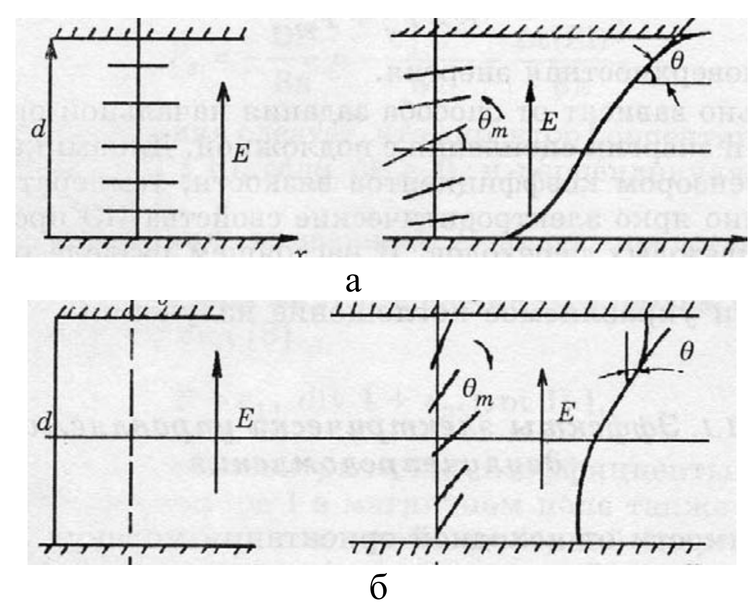


Рис.10. Эффекты Фредерикса: а – S-эффект, исходная ориентация планарная, $\Delta\varepsilon > 0$; B-эффект, исходная ориентация гомеотропная, $\Delta\varepsilon < 0$.

Разность фаз между необыкновенным и обыкновенным лучами для монохроматического света с длиной волны λ находится интегрированием по толщине слоя d:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}\int_0^d [n_e(z) - n_o]dz = \frac{2\pi d\langle \Delta n(z)\rangle}{\lambda} \qquad (8)$$

Интенсивность света, прошедшего через ячейку и анализатор, зависит от угла β между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора НЖК:

$$I = I_0 \sin^2 2\beta \sin^2 \Delta\Phi/2 \qquad (9),$$

где I_0 - интенсивность падающего на ячейку линейно поляризованного света. Изменение разности фаз приводит к осциллирующей зависимости оптического пропускания на выходе анализатора (рис.11).

Зависимости интенсивности света, прошедшего через ячейку, для S- и B-эффекта отличаются только тем, что в начальном состоянии соответственно $\Delta\Phi = \Delta\Phi_{max}$ и $\Delta\Phi = 0$, т.е начальное пропускание ячейки с гомеотропной ориентацией в скрещенных поляроидах минимально.

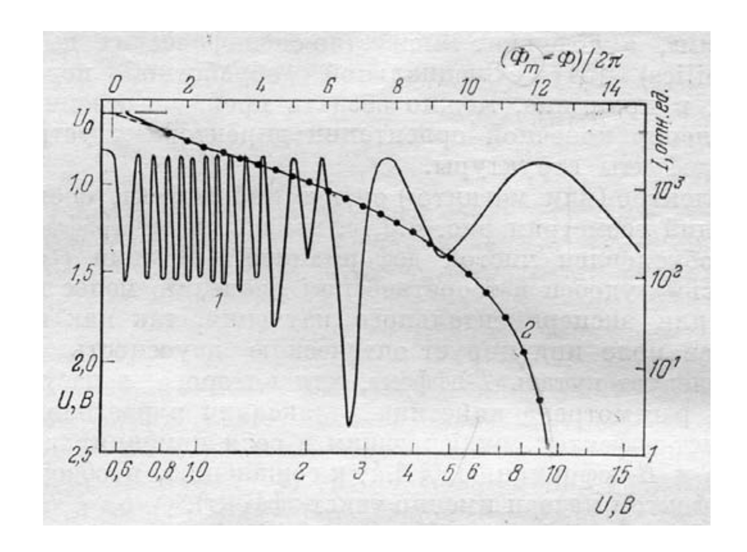


Рис.11. Кривая 1 – оптическое пропускание (масштаб справа и снизу), кривая 2 – фазовая задержка монохроматического света (масштаб слева и вверху) в случае S-эффекта.

Таким образом, внешнее электрическое поле изменяет направление директора, $\theta = \theta\ (E,\ z)$ и, следовательно, величины $\Delta n\ (E,z)$ и $\Delta\Phi\ (E)$.

Твист-эффект

Если при исходной планарной ориентации молекул направления директора на противоположных подложках перпендикулярны друг другу (рис.12) и вещество имеет положительную диэлектрическую анизотропию, то при приложении электрического поля вдоль оси z возникает ориентационный эффект, представляющий комбинацию из S-, B- и T-деформаций и называемый твист-эффектом.

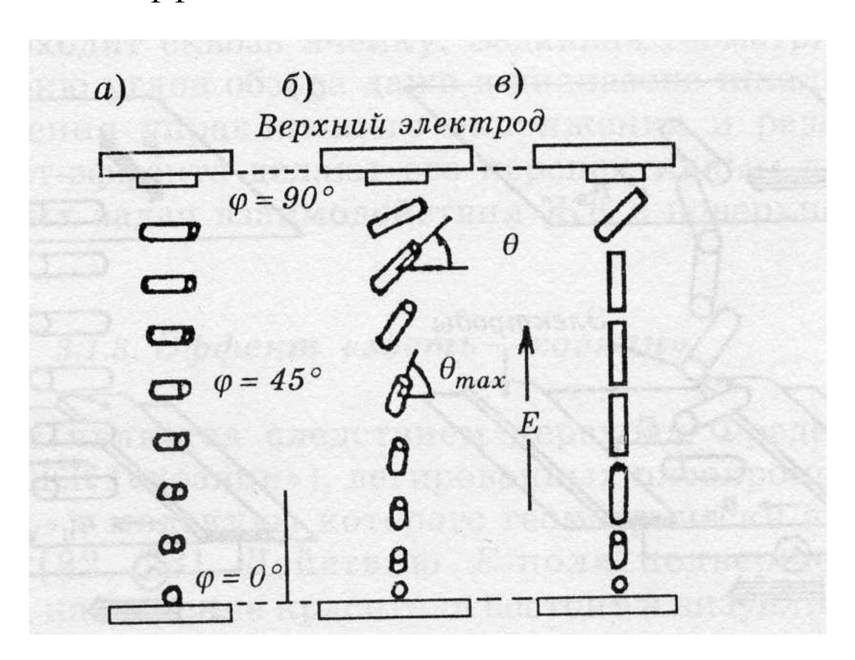


Рис.12. Твист-эффект в НЖК. Молекулярная ориентация: а – в отсутствии поля; б – при $U \geq U_п$; в – при $U >> U_п$.

Теория отклика твист-ячейки на внешнее электрическое поле строится по той же схеме, что и для S-эффекта. Разница заключается в том, что в случае твист-эффекта деформация является двумерной и от координаты z зависит не только угол наклона молекул *θ (z)*, но и их азимут *φ(z)*. В результате в выражение для порогового поля, определяющего начало деформации, входят все три модуля упругости НЖК.

$$E_n = \frac{\pi}{d}\sqrt{\frac{4\pi}{\Delta\varepsilon}}\sqrt{\left[K_{11} + \frac{1}{4}\left(K_{33} - K_{22}\right)\right]} \qquad (10)$$

С повышением напряжения угол наклона *θ (z)* увеличивается примерно так же, как при переходе Фредерикса из планарной ориентации. При достаточно большом напряжении молекулы в центральной части практически перпендикулярны электродам (θ_m=π/2). В результате при достаточно высоком поле твист-структура вообще перестает поворачивать плоскость поляризации света и ЖК ячейка в параллельных электродах оказывается прозрачной.

2.2. Ориентационные эффекты в холестериках

Оптические свойства ХЖК зависят от ориентации оси спирали относительно поверхности ячейки. Возможны четыре вида текстур, показанных на рис.13. Когда оси спирали перпендикулярны к подложкам текстура называется планарной, при этом наблюдается отражение падающего на ячейку света (рис.13а). При случайной ориентации осей возникает мультидоменная конфокальная текстура, рассеивающая свет (рис.13б). При приложении электрического поля перпендикулярно подложкам в ХЖК возникает текстура *отпечатков пальцев* с направлением осей спиралей параллельно подложкам (рис.13в). При приложении к ячейке более высокого напряжения для ХЖК с $\Delta\varepsilon > 0$ происходит раскрутка спирали и возникает гомеотропная ориентация молекул (рис.13д). В этом случае ячейка становится прозрачной.

Рассмотрим более детально влияние электрического поля на ХЖК в случае, когда его проводимость пренебрежимо мала. Тогда взаимодействие ХЖК с электрическим полем можно рассматривать как чисто диэлектрическое. Возможны различные варианты в зависимости от знака $\Delta\varepsilon$, исходной текстуры ХЖК и направления поля. Текстурные изменения в ХЖК аналогичны переходам Фредерикса в НЖК и приводят к существенному изменению оптических свойств слоя.

Ограничимся рассмотрением случаев, представляющих практический интерес, когда прикладываемое электрическое поле перпендикулярно к поверхности подложек и $\Delta\varepsilon > 0$.

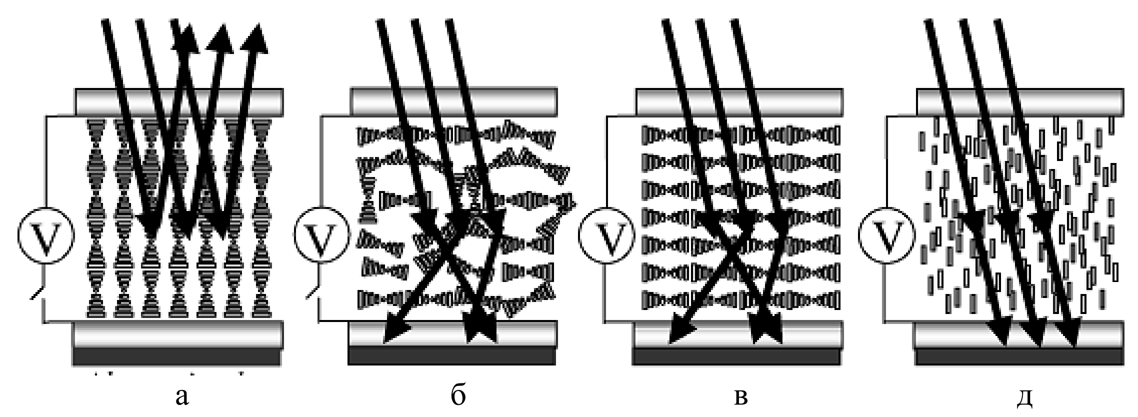


Рис. 13. Текстуры ХЖК: а – планарная, б – конфокальная, в – структура *отпечатков пальцев*, г – гомеотропная.

К плотности свободной энергии в электрическом поле добавляется величина [$-\Delta\varepsilon(\boldsymbol{En})^2/4\pi$]. Для планарной текстуры упругая энергия равна нулю, поскольку отсутствует деформация директора, в то время как для конфокальной текстуры она положительна из-за деформации изгиба слоя ХЖК. Для планарной текстуры электрическая энергия равна нулю, потому что ***n*** всюду в ячейке перпендикулярен ***E***, в то время как для конфокальной текстуры она отрицательна из-за деформации изгиба слоя ХЖК, потому что ***n*** параллелен ***E*** в некоторых областях. Упругая энергия противодействует переходу планарная - конфокальная текстура (П-К), в то время как электрическая энергия способствует переходу. Когда прикладываемое поле достаточно велико, планарная текстура становится нестабильной и переходит в конфокальную.

При приложении напряжения к конфокальной текстуре и его увеличении все больше молекул ХЖК ориентируется вдоль по полю, плавно переходя к текстуре *отпечатков пальцев*. При дальнейшем увеличении поля шаг спирали увеличивается, как показано на рис.14.

Когда поле превышает пороговое значение E_c, определяемое выражением

$$E_c = \frac{\pi^2}{P_0}\sqrt{\frac{K_{22}}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}}, \tag{11}$$

спираль полностью раскручивается, шаг становится равным бесконечности и ХЖК переходит в НЖК с прозрачной гомеотропной структурой.

Полная раскрутка спирали приводит к превращению оптически отрицательной ($\Delta n < 0$) и оптически активной планарной текстуры в оптически положительную ($\Delta n > 0$) неактивную текстуру. Для практического применения используют хиральные нематики, в которых при приложении электрического поля происходит раскрутка спирали и возникает гомеотропная ориентация молекул.

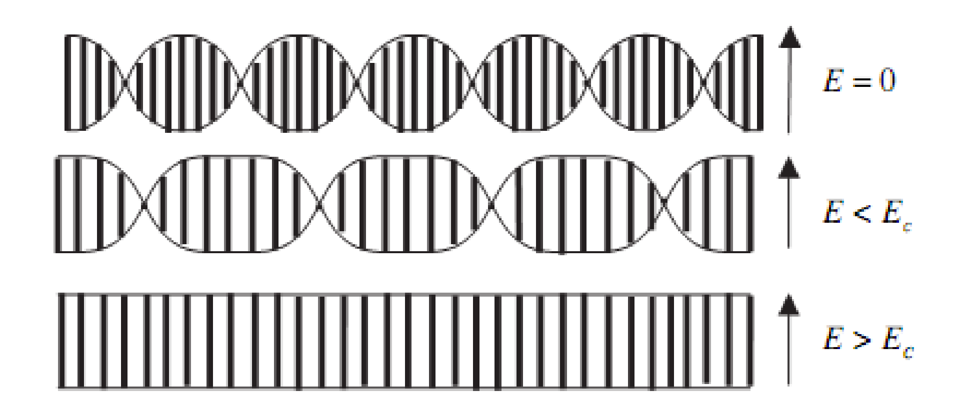


Рис.14. Схема перехода из текстуры *отпечатков пальцев* к гомеотропной текстуре, сопровождаемого раскруткой холестерической спирали. E_c – порог перехода в гомеотропную текстуру.

При уменьшении приложенного напряжения ХЖК имеет возможность перехода из гомеотропного состояния в одну из двух структур: конфокальную и планарную. В первом случае ХЖК релаксирует в состояние *отпечатков пальцев* и затем в конфокальную структуру, как это рассмотрено выше (рис.14). Переход является относительно медленным (время - порядка 100 мс) и имеет гистерезис. Во втором случае ХЖК релаксирует в планарное состояние (рис.15).

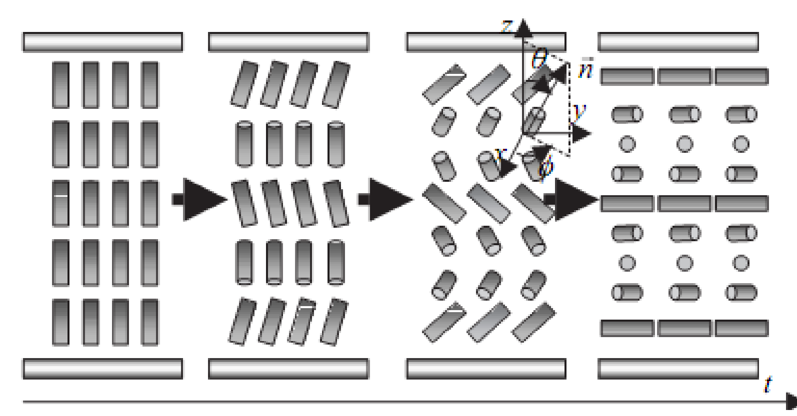


Рис.15. Схема перехода из гомеотропной текстуры к планарной.

Когда приложенное поле будет незначительно меньше E_c , происходит переход из гомеотропного состояния в структуру *отпечатков пальцев*. В поле, значительно меньшем, – происходит переход в планарное состояние. Причем в этом случае ХЖК сначала быстро релаксирует в *переходное* планарное состояние за время примерно 1 мс, а затем более медленно – в *стабильное* планарное состояние (100 мс). В бистабильных дисплеях на ХЖК используются оба перехода: в планарное отражающее состояние и не отражающее конфокальное состояние.

2.3. Электрооптические эффекты в сегнетоэлектрических смектических жидких кристаллах

Эффект Кларка-Лагерволла

В ЖК устройствах обычно требуется однородная ориентация директора. Однако, в смектике С* директор закручен от слоя к слою. Кларк и Лагерволл предложили создать однородную ориентацию директора в смектике С* за счет влияния поверхности (поверхностно стабилизированный сегнетоэлектрический ЖК - SSFLC). ЖК расположен между двумя параллельными подложками в зазоре, величина которого меньше шага спирали (рис.16). На внутренние поверхности подложек нанесен ориентирующий слой, обеспечивающий расположение директора параллельно подложкам. Смектические слои перпендикулярны подложкам, в то время как ось геликоида параллельна подложкам. Таким образом, поверхность осуществляет раскрутку спирали. Возможны только два направления $\boldsymbol{A_1}$ и $\boldsymbol{A_2}$, лежащие на поверхности конуса и совпадающие с плоскостью подложек. Угол при вершине конуса 2θ, и потому тот же угол будет между $\boldsymbol{A_1}$ и $\boldsymbol{A_2}$. Эти два направления ориентации могут быть выбраны при приложении постоянного электрического поля перпендикулярно к подложкам.

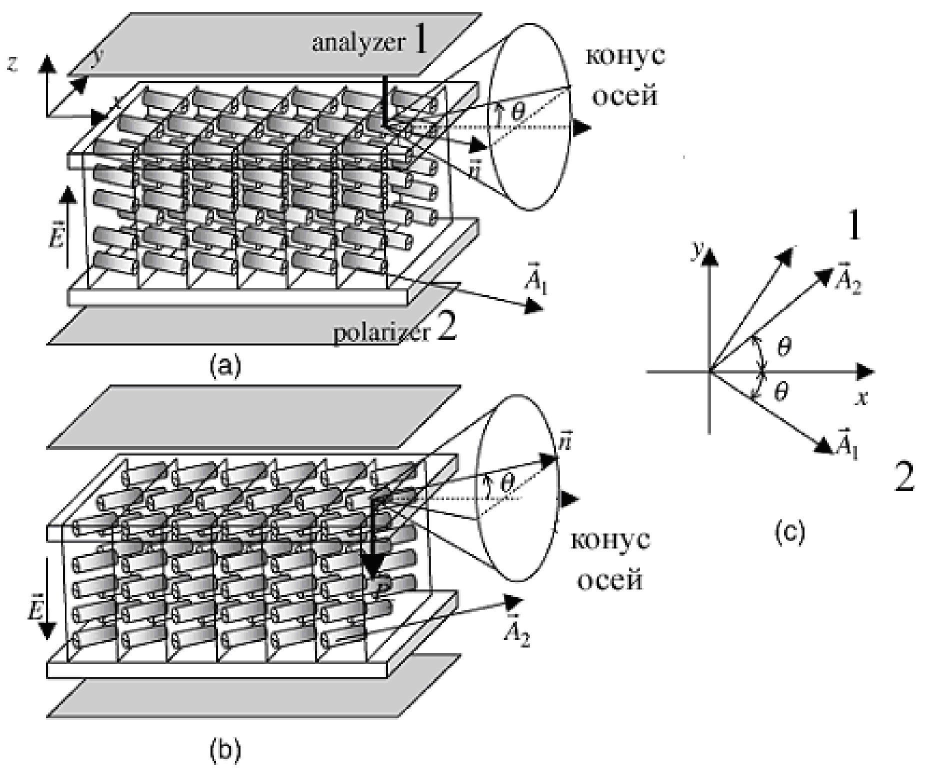


Рис.16. Схема структуры «книжная полка» для дисплея с поверхностно стабилизированным сегнетоэлектрическим ЖК. (а) – директор ориентирован вдоль направления $\boldsymbol{A_1}$, когда поле направлено вверх; (b) - директор ориентирован вдоль направления $\boldsymbol{A_2}$, когда поле направлено вниз. (c) – поляризатор 2 и анализатор 1 скрещены, поле дисплея темное.

Например, если поле направлено в сторону +z, директор ориентируется вдоль $\boldsymbol{A_1}$, потому что вектор спонтанной поляризации $\boldsymbol{P_s}$ направлен вверх и параллелен полю. Если поле направлено в сторону - z, директор ориентируется вдоль $\boldsymbol{A_2}$, потому что вектор спонтанной поляризации $\boldsymbol{P_s}$ направлен вниз. С помощью внешнего поля осуществляется переключение в состояние $\boldsymbol{A_1}$ (или $\boldsymbol{A_2}$), которое сохраняется при снятии поля из-за наличия энергетического барьера между этими двумя состояниями. Наличие бистабильности важно для мультиплексного управления дисплеями. На практике возникают трудности в создании бистабильных поверхностно стабилизированных дисплеев большой апертуры, вызванные структурной неоднородностью поверхности.

В SSFLC дисплее поляризатор размещают параллельно одному из стабильных состояний, например, $\boldsymbol{A_1}$**,** а анализатор – перпендикулярно. Когда ЖК находится в состоянии $\boldsymbol{A_1}$, поляризация падающего света параллельна директору и не изменяется при прохождении через ячейку. Когда свет проходит через анализатор, дисплей темный. Когда ЖК переключается в состояние $\boldsymbol{A_2}$, поляризация света изменяется на угол 2θ относительно исходного направления директора.

Светопропускание дисплея описывается выражением:

$$T = \sin^2(4\theta)\sin^2\left(\frac{1}{2}\frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}\right) \qquad (12)$$

Максимум светопропускания 100% может быть достигнут при $2\theta = \pi/4$ и $2\pi\Delta nd/\lambda = \pi$. Для сегнетоэлектрических ЖК с вектором спонтанной поляризации $\boldsymbol{P_s}$ плотность электрической энергии равна ($\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{P_s}$)**.** Характерное значение P_s составляет 10^{-3} Кл/м^2. При напряженности поля 10^6 В/м и направлении $\boldsymbol{P_s}$ параллельном $\boldsymbol{E}$ плотность электрической энергии равна 10^3Дж/м^3, которая значительно выше, чем плотность энергии в электрическом поле для не сегнетоэлетрических ЖК. Это является одной из причин уменьшения времени переключения устройств на сегнетоэлектрических ЖК. В случае, если $P_s = 10^2$ нКл/см^2, E = 1В/мкм, ν = 0,1 пуаз и θ = 22,5°, время переключения примерно равно 10 мкс.

Достоинством устройств на сегнетоэлектрических ЖК является их высокое быстродействие. Наличие бистабильности позволяет обеспечить мультиплексное управление для пассивно-матричных дисплеев. Недостатками устройств, использующих эффект Кларка-Лагерволла, являются сложность обеспечения шкалы серого, однородной ориентации и создания строго определенной толщины зазора.

Эффект деформации геликоида

При приложении электрического поля к смектику С* может наблюдаться эффект деформации геликоида (DHF). Для реализации этого эффекта используется ячейка, схема которой приведена на рис.17.

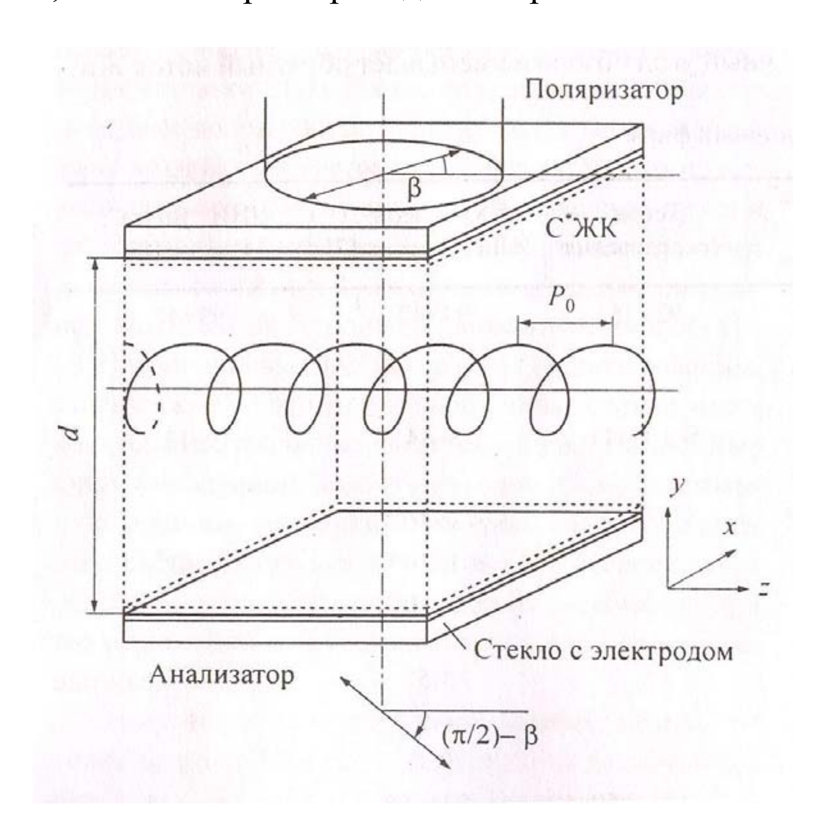


Рис. 17. Схема ячейки с эффектом деформации геликоида в СЖК* (DHF-эффект).

Плоскость поляризации света, проходящего через поляризатор Р, составляет угол β относительно оси геликоида. Анализатор скрещен с поляризатором. Слои смектика ориентированы перпендикулярно подложкам и имеют толщину *d,* существенно большую шага геликоида R_0. Световой поток с апертурой гораздо большей R_0 направлен параллельно сегнетоэлектическим слоям. При приложении электрического поля геликоидальная структура деформируется так, что соответствующая зависимость распределения директора $\cos\varphi$ от параметра $2\pi z/R_0$ изменяется симметрично при изменении знака электрического поля $\pm E$ (рис.18). Это приводит к изменению эффективного показателя преломления. Эффект наблюдается при увеличении поля вплоть до раскрутки геликоида E_u:

$$E_u = \frac{\pi^2}{16}\frac{K_{22}q_0^2}{P_s}, \qquad (13)$$

где K_{22} – коэффициент упругости при деформации геликоида, $q_0 = 2\pi z/R_0$.

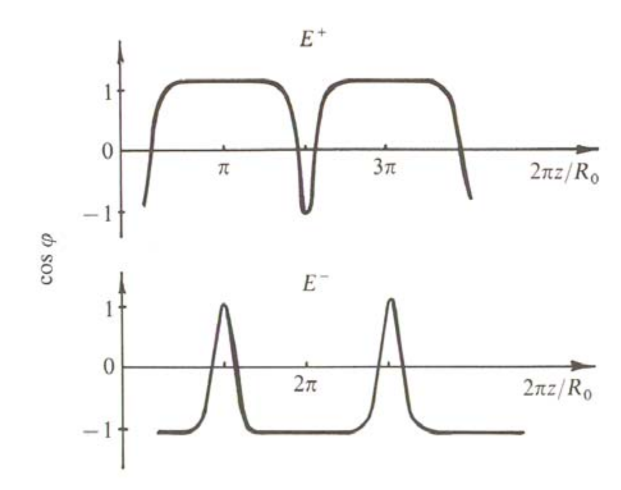


Рис.18. Зависимость распределения директора *cosφ* от параметра $2\pi z/R_0$ при изменении знака электрического поля.

Характеристическое время τ_c эффекта в малых полях $E/E_u << 1$ не зависит от поляризации P_s и поля E и определяется только вращательной вязкостью γ_φ и шагом геликоида R_0. Эта зависимость действительна для очень малых электрических полей.

Электроклинный эффект

Электроклинный эффект состоит в индуцированном изменении угла наклона молекул в смектике А вблизи фазового перехода в смектик С*. В отсутствии электрического поля директор перпендикулярен плоскости слоя (рис.19 b).

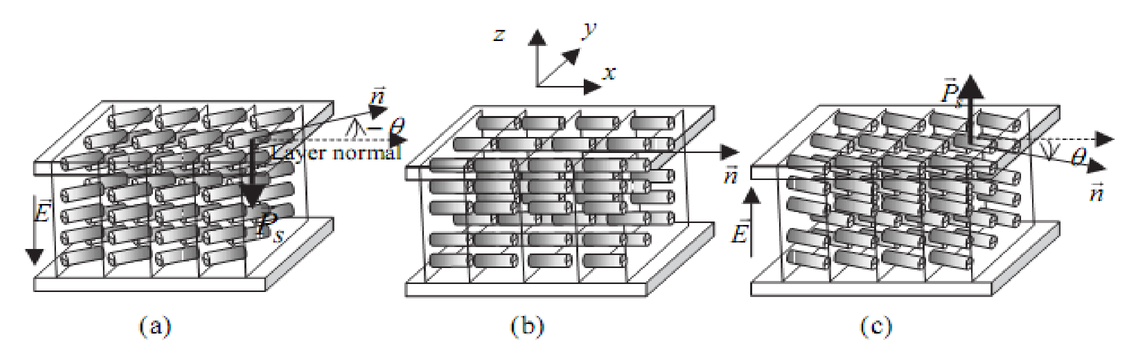


Рис.19. Схема электроклинного эффекта в смектике А.

Поперечный дипольный момент может ориентировать длинные оси молекул равновероятно в двух направлениях относительно слоя. При уменьшении температуры и ее приближении к фазовому переходу из смектики А в смектику С* возникают нестабильные домены со структурой смектики С*. Каждый домен имеет спонтанную поляризацию, однако макроскопическая поляризация равна нулю из-за хаотичного расположения векторов поляризации отдельных доменов. При приложении электрического поля перпендикулярно ячейке домены стабилизируются, и векторы их поляризации ориентируются параллельно, что отвечает условию минимума энергии. При этом формируется однородная структура смектики С*, и

угол наклона директора становится не равным нулю. Эффект возникновения угла наклона молекул в смектике А, индуцированного полем, известен как электроклинный эффект. На рис.19а и 19с показаны ориентации молекул для двух различных направлений электрического поля.

Индуцированный угол θ линейно зависит от приложенного поля. Угол наклона может достигать величины более 10° при напряженности поля 10 В/мкм для некоторых ЖК. Экспериментально были достигнуты времена отклика порядка нескольких микросекунд, что является большим достоинством электроклинного эффекта. Это позволило успешно использовать его в быстродействующих электрооптических модуляторах (до частоты 2 мГц), цветных фильтрах для ТВ камер, быстрых затворах с высоким пространственным разрешением. Для примера, оптически адресуемые пространственно-временные модуляторы света, основанные на электроклинном эффекте, имеют быстродействие в 10-100 раз большее, чем эффект Кларка-Лагерволла. Электроклинный эффект позволяет создать широкий ряд модуляторов света с линейной шкалой серого. Недостатками этого эффекта являются сильная температурная зависимость и малая глубина модуляции.

В сегнетоэлектрических ЖК обнаружен и ряд других электрооптических эффектов, таких как раскрутка геликоида, эффект гость-хозяин, электрогидродинамическая неустойчивость и др., которые в настоящее время не нашли практического применения в дисплеях.

3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСПЛЕЯХ И РАЗВИТИИ ДИСПЛЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Дисплеи являются основной областью применения ЖК материалов. Они широко используются в повседневной жизни в качестве мониторов персональных компьютеров, телевизионных экранов, систем отображения информации в мобильных телефонах, цифровых камерах, электронных записных книжках, системах навигации и т.д. Развитие дисплейных технологий существенно влияет на теорию и экспериментальные исследования в ЖК, определяет разработку новых материалов и технологий. Конкуренция с дисплеями, основанными на других принципах, способствовала совершенствованию эксплуатационных характеристик ЖК-дисплеев (ЖКД). Развитие шло по пути формирования изображений, все более приближающихся к отображению реальных объектов: от черно-белых и монохромных, далее к многоцветным, полно цветным и, наконец, объемным дисплеям. Описанию их развития посвящен ряд монографий [1-13] и множество статей.

Современное общество живет в постоянно изменяющемся информационном поле, характеризуемом объемом и пространственно-временным распределением накопленной информации. На протяжении всей эволюции человечества средства связи, накопление и обмен информацией во многом определяли этапы развития цивилизации. На рис.20 показано расширение сферы общения от взаимодействия отдельных людей в эпоху земледельческо-общинного строя до массовой сферы общения в наше время [14-16]. Информация производится, хранится, преобразовывается, кодируется, умножается, воссоздается и воплощается в материальные ценности и предметы культуры. Научно-техническая революция, породившая системы компьютерного управления сложными объектами и обработки больших массивов информации, привела к созданию комплексов «оператор-компьютер». Их основу составляют визуальные системы отображения информации (СОИ), поскольку до 90% внешней информации человек воспринимает в виде зримых образов. Обязательным элементом СОИ являются средства индикации – информационные дисплеи со схемами управления, ввода-вывода, преобразования и хранения. Дисплей – это принципиально новый носитель, оперативно синтезирующий ее изобразительном и текстовом форматах. Дисплей стал частью повседневной жизни, заменяя газеты, журналы, каталоги, рекламные листки и др. Как показано на рис.20, он превратился в одну из вершин развития информационных технологий.

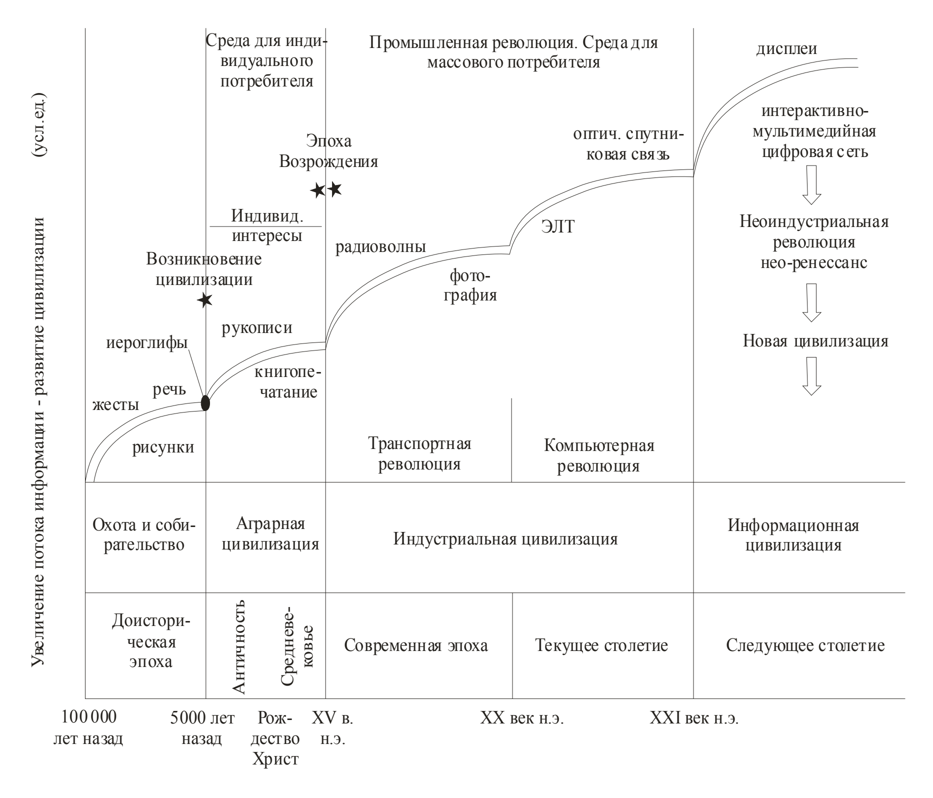


Рис.20. Схема, иллюстрирующая увеличение потока обмена информацией в процессе развития общества [14-16].

Сегодня это экран телевизора и мобильного телефона, монитор компьютера, медицинского прибора, циферблат наручных электронных часов и информационное табло коллективного пользования. Мало кого интересует носитель, нужна сама информация. Современный дисплей – это оптическое устройство, преобразующее входной (обычно электрический) сигнал в видимое изображение [16].

3.1. Современные дисплейные технологии

Основные требования, предъявляемые к информационным дисплеям

Состояние развития дисплеев определяется уровнем фундаментальных исследований, разработкой элементной базы и технологией их изготовления. Независимо от используемых физических принципов, используемых при разработке дисплеев, можно сформулировать основные требования, предъявляемые к ним:

1. Высокий контраст, позволяющий воспринимать отображаемую информацию в широком диапазоне освещенности и углов обзора.
2. Высокое пространственное и временное разрешение, позволяющее отображать высокие пространственные частоты движущихся объектов.
3. Широкий диапазон отображаемых цветовых параметров и уровней (шкалы) серого, позволяющий получать изображения максимально соответствующие воспроизводимым визуальным данным.
4. Широкий диапазон размеров экранов зависимости от назначения (малые – для автономных переносных устройств индивидуального пользования; большие – для стационарных устройств коллективного пользования).
5. Возможность создания гибкого экрана.
6. Широкий интервал условий эксплуатации, включая раггедизацию устройств, т.е., например, подогрев при работе в области отрицательных температур.
7. Низкая потребляемая энергия, позволяющая использовать малогабаритные маломощные автономные источники питания.
8. Долговечность.
9. Высокая технологичность, обеспечивающая возможность выпуска изделия массовым тиражом и являющаяся экологически безопасной.
10. Низкая стоимость.

Классификация дисплеев

Существует много классификационных признаков, по которым подразделяют современные дисплеи.

1. По размерности изображения объекта различают дисплеи двумерные (плоские) и трехмерные (объемные).
2. С функциональной точки зрения различают дисплеи стационарные, коллективного пользования, и индивидуальные, автономные (переносные) дисплеи. Стационарные дисплеи – это большие телевизионные экраны или информационные табло, дисплеи для отображения чрезвычайных ситуаций с использованием спутниковой связи, диспетчерские пульты и др. Общая тенденция их развития – максимально реалистичное отображение информации – увеличение размера и разрешающей способности экранов и создание терминалов широкого функционального назначения. К автономным (переносным) дисплеям можно отнести микродисплеи телевизионного назначения, мониторинга состояния здоровья, устройств управления и контроля, виртуального мира развлечений. К ним же относятся ноутбуки, дисплеи для мобильных телефонов и цифровых видео- и фотокамер. В перспективе этот тип предназначен для терминалов интернета и беспроволочных информационных устройств.

3. Ключевым параметром дисплея является размер экрана, определяющей его назначение и выбор физического принципа. Схема назначения дисплеев в зависимости от размера экрана и разрешения приведена на рис.21.

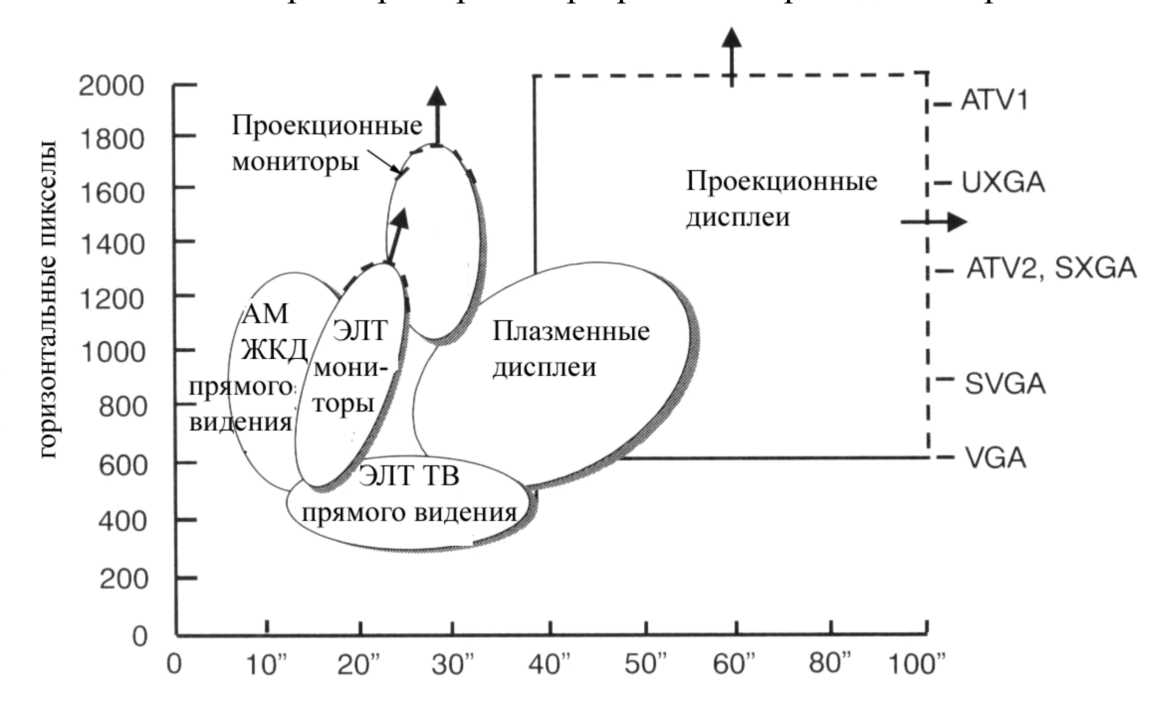


Рис.21. Принципы построения дисплеев в зависимости от размера (в дюймах) и горизонтального числа пикселов.

По этим признакам различают дисплеи прямого наблюдения и проекционные дисплеи. Размеры дисплеев прямого наблюдения ограничены технологическими возможностями и составляют по диагонали от нескольких дюймов (микродисплеи) до 40”-50”. За последние годы в связи с развитием телевидения высокой четкости размеры экрана возрастают до 100”и более. Дальнейшее увеличение размеров экрана представляется экономически малооправданным, и отображение информации на экране большего размера проще осуществлять средствами проекции изображений. Возможно также увеличение размера за счет создания блочных (наборных) экранов, собираемых из нескольких экранов прямого наблюдения.

Плазменные панели занимают промежуточное положение между проекционными устройствами и дисплеями прямого наблюдения.

4. По размещению различают дисплеи для авиации и космической электроники (авионика); для наземных транспортных средств; для морского флота; для индивидуальных мобильных средств; для командных средств управления и др.

5. По режимам управления дисплеи разделяют на матричные и мультиплексные.

6. По оптическим свойствам различают активные (генерирующие излучение) и пассивные дисплеи, работающие на просвет или на отражение.

В следующем разделе основное внимание будет уделено принципам построения дисплеев, определяющим их важнейшие эксплуатационные характеристики.

Краткий анализ современных систем отображения информации

К настоящему времени разработано большое количество конкурирующих между собой дисплеев, основанных на различных физических принципах: дисплеи на электронно-лучевых трубках (ЭЛТ), плазменные панели (ПП), светодиоды (СД), вакуумные люминесцентные, полевые эмиссионные дисплеи и ЖКД. Рассмотрим, в какой степени различные дисплеи удовлетворяют предъявляемым требованиям, и проанализируем их достоинства и недостатки.

Дисплеи на электронно-лучевых трубках

Важным достижением с момента создания ЭЛТ была замена черно-белого экрана цветным. Кроме того, происходило постоянное увеличение размера экрана по диагонали. Для современных ТВ экранов он находится в диапазоне от 2 см до 1 м. Увеличение размера экрана неизбежно связано с увеличением объема ЭЛТ. Одновременно росла разрешающая способность, что привело к созданию телевидения высокой четкости (ТВВЧ, 1280×720). Последние десятилетия характеризуется жесткой конкуренцией дисплеев на ЭЛТ и ЖКД в борьбе за рынок персональных компьютеров,

которая после 1990 г. завершилась победой ЖКД. Их разрешение характеризуется соотношением числа строк и столбцов в соответствии со следующим стандартом форматов: VGA (640×480), SVGA (800×600), XGA (1024×768), SXGA (1280×1024), UXGA (1600×1200), QSXGA (2560×2048). Ожидается, что размеры пикселов высокоинформативных моделей A-HIC-LCD составят 126 мкм с промежутком 42 мкм. Это будут более быстродействующие пикселы, работающие от малых напряжений и обладающие эффектами памяти. Конкуренция со стороны ЖКД заставляет разработчиков ЭЛТ искать пути их совершенствования. Одним из таких путей является разработка проекционного сканирующего устройства, названного квантоскопом (рис.8.3а, б) [17]. Он основан на другом принципе: использовании в качестве источника излучения полупроводникового лазера на основе материалов группы $A_{II}B_{IV}$ (CdSe, CdS, NdSSe, ZnSe, ZnSSe) с электронной накачкой. Достоинство квантоскопа состоит в достижении высоких характеристик, приведенных в таблице 1.

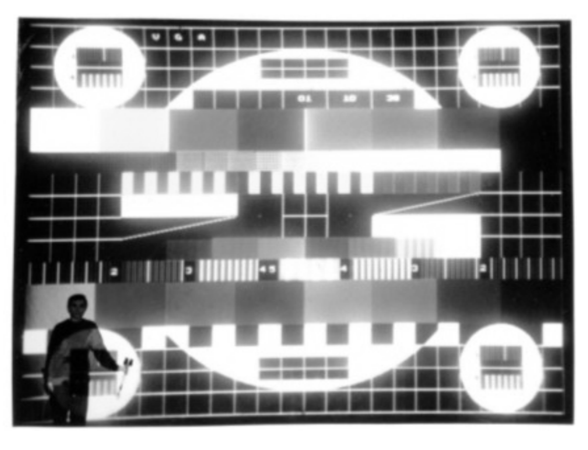
Таблица 1.

Основные эксплуатационные характеристики квантоскопа

Световой поток для белого излучения – 5000 лм	Потребляема мощность – 4 кВт
Световой поток для белого излучения – 5000 лм	Потребляема мощность – 4 кВт
Яркость на экране площадью 30м2 - 100кд/м^2	Катодное напряжение – 60 кВ
Контраст – 80	Охлаждение – 120 К
Разрешающая способность – 1000 пиксел/лин.	Долговечность – 10000 ч



а



б

Рис.22. Квантоскоп: а - внешний вид; б - цветное изображение миры, спроецированное на экран размером 30 м^2.

Недостатками являются низкая долговечность, высокая потребляемая мощность, катодное напряжение и необходимость охлаждения до температуры 120 К. За последнее время долговечность увеличена до 10.000 часов. Несмотря на достигнутые характеристики, на пути реализации стоит много проблем, в частности, избавление от системы охлаждения.

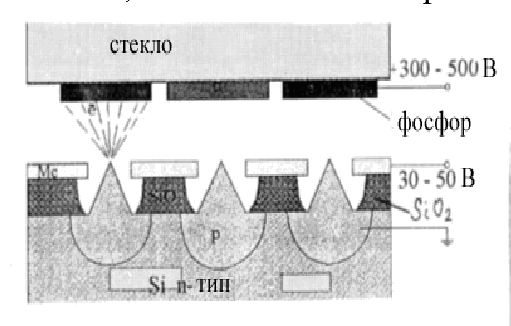
Другим направлением является создание устройства с плоским экраном матричного типа без отклонения пучка электронов. Работы по созданию плоского экрана, альтернативного традиционной ЭЛТ заставили разработчиков обратиться к созданию самосветящегося катодолюминесцентного дисплея. Катодолюминесцентные технологии, реализующие наиболее эффективные способы преобразования электрической энергии в световую в видимом диапазоне, основаны на вакуумных флуоресцентных (ВФД) и полевых эмиссионных дисплеях (ПЭД). ВФД используют эффект катодолюминесценции при низком (40-100 В) или среднем напряжении (100-500 В), состоящий в испускании фотонов экраном под воздействием пучка электронов с энергией в несколько эВ. Достижения разработчиков ВФД опираются на развитую технологию изготовления вакуумных элементов и электронных ламп. Первый прототип такого дисплея был продемонстрирован французской компанией LETI в 1991 г., показавший повышение яркости изображений, отсутствие инерционности и независимость от внешней температуры. Двигаясь от массива эмиссионных катодов, выполненных в форме молибденовых конусов, электроны ударяются о слой люминофора на катоде. Фокусировка обеспечивает размеры пикселя менее 100 мкм [18]. Недостатком конструкции явились конусообразные катоды, форма которых притуплялась, что приводило к падению тока автоэлектронной эмиссии. Это привело к разработке различных модификаций устройства. Одним из достижений прошлых лет явилось создание в НИИ «Волга» (Саратов) большого мультимодульного экрана с яркостью 5000 кд/м^2 и размером 50-100 м^2. Там же были разработаны прототипы монохромных и цветных ТВ экранов с размерами диагонали 8” и 14”, разрешением VGA и QVGA и управляющим напряжением от 35 В. Они создавали яркость 200 (G), 100 (R) 50 (B) кд/м^2 для соответствующих длин волн светового излучения, что позволяло использовать их при освещенности 200-300 лк в расширенном интервале температур -40…+85°С. Поле зрения составляет ±45-70°, долговечность 20-30 тыс. часов. Характеристики дисплеев с термокатодом, разработанных в НИИ «Волга», приведены в [19].

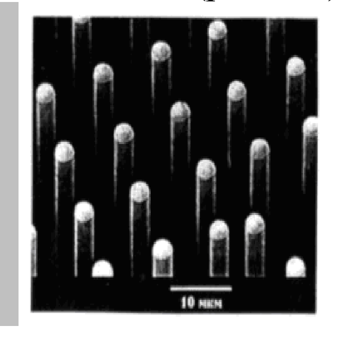
ПЭД, как и ВФД, состоят из двух частей: матрицы микроскопических электронных пушек (катодов), изготовленных с высокой плотностью, и катодолюминесцентных экранов, работающих при низких или средних величинах напряжения. Отличие ПЭД от ВФД состоит в том, что электроны испускаются не нагретой нитью, а холодным катодом, что экономит до половины расходуемой ВФД энергии. Другое достоинство ПЭД состоит в

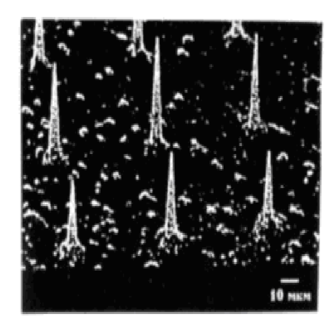
возможности выполнения катода в виде адресующих электродов, например, в виде матрицы. Для увеличения напряженности поля при работе с низкими управляющими напряжениями электроды, выполненные в виде острия, должны сохранять свою конфигурацию при эксплуатации. Различия в устройствах ПЭД объясняются различиями в технологии изготовления электродов. Модификации ПЭД в России были разработаны в НИИ «Волга» совместно с компанией Самсунг (Корея), институте Кристаллографии РАН и институте физических проблем (Москва).

В 2000 г. в НИИ «Волга» была создана технология формирования планарно-торцевых эмиттеров из тонких пленок алмазоподобного углерода. Результаты исследования свойств полученных структур приведены в [19] и свидетельствуют о высоких характеристиках и долговечности прибора.

В институте физических проблем (г. Зеленоград) вместо традиционных молибденовых катодов были использованы кремниевые электроды. При напряжении 300-500 В матрица разрядом 786×192 пиксел с размером острия 0,27×0,27 мм и напряжением смещения 30-50 В обеспечила яркость 300 кд/м^2 (рис.14а). ПЭД с кремниевыми остриями и алмазным покрытием разработки института кристаллографии РАН при напряжении 3 кВ и мощности 0,5 Вт обеспечили яркость 2000 кд/м^2 (рис.23б) [20].







а б

Рис.23. Схемы полевых эмиссионных дисплеев: а - с кремниевыми катодами; б - с кремниевыми катодами, покрытыми алмазной пленкой.

Основные эксплуатационные характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Основные эксплуатационные характеристики ПЭД на основе кремния

С кремниевыми катодами Напряжение – 300 -500 В, смещение – 30 - 50 В Матрица 786 × 192, размер острия 0,27 × 0.27 мм Яркость – 300 кд/м^2	С кремниевыми катодами, покрытыми алмазной пленкой Напряжение – 3 кВ, Мощность – 0,5 Вт. Яркость – 2000 кд/м^2

Ряд зарубежных фирм выпускает ПЭД средних размеров: фирма Канденсент (Candescent) - 5.3” QVGA, 13.2” SVGA; фирма Пикстех (Pix-tech) - 5.2” QVGA для монохромных дисплеев со шкалой серого и 5.6” QVGA для цветных, фирма Futaba - 7.2” QVGA and VGA для монохромных дисплеев. Поле зрения ПЭД составляет 160°, диапазон рабочих температур от -40 до 70ºС. В этом они превосходят ЖКД (поле зрения 120º, диапазон рабочих температур от 5 до 35ºС). Поэтому их применяют в авионике, медицине и в качестве дисплеев передней панели автомобилей.

Достоинствами ПЭД являются высокая эффективность в видимом диапазоне, малые времена переключения (≈1 мс), большие углы обзора и возможности обеспечения широкого диапазона шкалы серого и цветовой гаммы.

Сложность изготовления катодов заставляет искать новые решения. Одним из них является разработка печатной технологии изготовления холодных катодов, предложенной компанией Printable Field Emmiters, Великобритания. Технология существенно снижает стоимость панели размером 20-40”[21]. Обзор зарубежных достижений по разработке ПЭД и перспективам их развития приведен в работах [22, 23].

Плазменные панели

Работа плазменных дисплейных панелей (ПДП) основана на излучении света при разряде в инертном газе. Их достоинством является высокая яркость (до 350 кд/м^2), широкий угол обзора (до 160°), большая информационная емкость (от 800×1300 до 2048×2048 пикселов) и высокая надежность работы при отрицательных температурах. ПДП прочно заняли область экранов большого размера. Фирмы LG, Самсунг (Южная Корея) и Пласмако (США) изготовили панель с размером 1,5 м по диагонали и разрешением SXGA. Такие панели используются как информационные табло в местах большого скопления людей (стадионы, вокзалы, концертные залы), как экраны домашних кинотеатров или как элементы диспетчерских служб МЧС, экологических служб и систем управления производственными процессами. В последних разработках фирмы Пласмако достигнуты яркости более 450 кд/м^2, ее долговечность составляет 10000 часов.

В Рязанском НИИ ГРП разработана ПДП с диагональю 102 см. Но большее развитие в стране получило создание больших экранов, собираемых из отдельных модулей, также изготовляемых в Рязани. Размеры модуля 19×19 см или 40×40 см, шаг пикселя от 3 до 12 мм. Управление от переменного сигнала (200 В) позволяет повысить яркость в 2-3 раза по сравнению с питанием от постоянного напряжения (360 В). Рабочее значение яркости – около 400 кд/м^2, а пиковое – 700-800 кд/м^2 [24]. Угол обзора ± 80°. По разрешению плазменные панели занимают промежуточное положение

между ЖКД и светоизлучательными дисплеями. Различные цветовые характеристики обеспечиваются типом инертного газа и характеристиками люминофора. Недостатком многомодульной панели является ограниченный диапазон градаций яркости (64 ступени), большие потери света при отражении от передней поверхности, наличие прямоугольной сетки на стыке модулей и невысокая степень однородности светотехнических характеристик отдельных модулей в составе экрана. Эти недостатки устраняются технологическими средствами: использованием голографических диффузоров и отражателей, изменением формы торцевого шва и его заполнение специальным стеклоцементном. Однако нерешенной проблемой остается большая потребляемая мощность из-за низкой световой эффективности (0,3-0,4 лм/Вт для панелей постоянного тока). Детальные сведения о пламенных панелях приведены в работах [25, 26].

ПДП, появившиеся на рынке в 1997 г., были пионерами в создании дисплейных панелей больших размеров экрана, которым предсказывалась монополия в этой области. Однако это предсказание не подтвердилось: совершенствование ЖК технологий позволило применять их не только в телевидении и мобильных дисплеях, но и для цифровых информационных дисплеев больших размеров экрана. К тому же, стоимость проекционного активно-матричного ЖКД с аналогичным размером экрана оказалась вдвое дешевле. Основы изготовления цветных плазменных панелей изложены в работе [27].

Светодиодные дисплеи

Развитие полупроводниковых светодиодов (СД) на соединениях $A_{III}B_V$ привело к их применению в светосигнальных и осветительных приборах, а также информационных экранах большого размера и системах подсветки ЖК панелей [28, 29]. Согласно нормативам для безошибочного считывания информации с экрана при ярком солнечном свете (40 000 лк) требуется яркость не ниже 6200 кд/м^2. Светодиодные экраны позволяют обеспечивать такие яркости, что выгодно отличает их от многих технологий. Изменением материала полупроводника получают СД зеленого, синего и красного цветов свечения. Максимальной эффективностью преобразования обладают красные СД, минимальной – синие. Сочетанием СД с тремя основными цветами получают белый СД, хотя большей эффективностью обладают монохромные СД с дополнительными люминесцентными слоями, преобразующие монохромное излучение в белое.

Важной проблемой является обеспечение требуемых углов обзора. Одно из решений состоит в использовании микро структурированных пленок в виде линз Френеля, размещаемых перед излучающим элементом. Изменяя профиль микрорельефа линз Френеля, получают различные углы вывода излучения. Другой проблемой является необходимость теплоотво-

да от системы преобразования СД, поскольку выделение тепла приводит к снижению яркости излучения до 50%, деградации материала и сдвигу максимума длины волны излучения в длинноволновую область, ухудшающему цветопередачу системы. Еще одной проблемой явилась нестойкость СД к пробою статическим электричеством. Решение было найдено при использовании полупроводникового стабилитрона и размещением InGaN-эпитаксиальной структуры на проводящей подложке карбида кремния. Эти меры повысили порог пробоя до 1000 В. Однако остается задача повышения долговечности этих устройств.

В настоящее время работы по созданию дисплеев на основе люминесцирующих материалов ведется в двух направлениях: с использованием низкомолекулярных органических соединений (OLED) и полимерных светоизлучательных материалов (PLED) [30].

Первое сообщение о создании OLED появилось в 1987 г. С тех пор во многих лабораториях создаются материалы и устройства этого типа дисплея. Физические принципы построения устройств на OLED подробно изложены в работе [31, 32]. В основе работы OLED лежит эффект создания с помощью приложенного к электродам поля транспорта электронов и дырок. Органический слой находится между ортогональных системой катодов и анодов. Со стороны анода органический слой имеет прозрачную зону транспортировки дырок, затем эмиссионную зону, где в результате рекомбинации дырок и электронов осуществляется светоиспускание, и электронную транспортную зону. Яркость OLED определяется силой тока. Такая гетероструктура излучает на длине волны 570 нм с яркостью от 2000 до 13000 кд/м^2, хорошей эффективностью выхода (от 56-66 кд/А; 8,96-18,3 лм/Вт) и высокой квантовой эффективностью (14,8-16,2%). Тонкие твердые пленки, обладающие светоизлучением, не нуждаются в задней подсветке; спектральный состав излучения можно изменять подбором красителей; требуемое напряжение составляет несколько вольт; обеспечивается высокая яркость, контраст, большие углы наблюдения (160°) и малые времена переключения (доли мкс). Привлекательным является возможность использования гибких подложек. Их преимущества по сравнению со стеклянными состоят в большей прочности, компактности, легкости и дешевизне. Это способствует развитию эластичных дисплеев, располагаемых на изогнутых поверхностях. Изготовление гибких подложек ограничено низкими допустимыми температурами (не более 200°С), усадочными деформациями, низкой герметичностью и химической стойкостью, двулучепреломлением, малым светопропусканием и шероховатостью поверхности. ¼ VGA цветной OLED дисплей был впервые изготовлен фирмой Pioneer в 1999 г. Сейчас разработкой таких дисплеев занимаются фирмы Seiko-Epson, Kodak, Sanyo и ряд других.

В Зеленограде в АООТ и НИИМЭ и предприятии «Микрон» налаживается производство дисплеев на основе производных пиразолхинолина и алюминий-гидроксихинолина с антраценовыми добавками. Сообщается о производстве полимерных светодиодных панелей с размером рабочего поля 100×100 мм, разрешением 388×268 пиксел, яркостью 1900 кд/м^2 при напряжении 5 В и токе 2,6 мА. Недостатком OLED является малая долговечность (10000 ч. для зеленого, 4000 ч. для красного, 700 ч. – для синего), недостаточная стабильность характеристик и относительно высокая стоимость. В дальнейшем предполагается создание микро полимерных OLED и полимерных OLED по технологии комплементарного полупроводника на основе окиси металла (CMOS).

Краткий анализ рассмотренных типов дисплеев показал, что все они обладает своими достоинствами и недостатками, но не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к современным дисплеям. В большей степени, как это будет показано ниже, этим требованиям отвечают ЖКД.

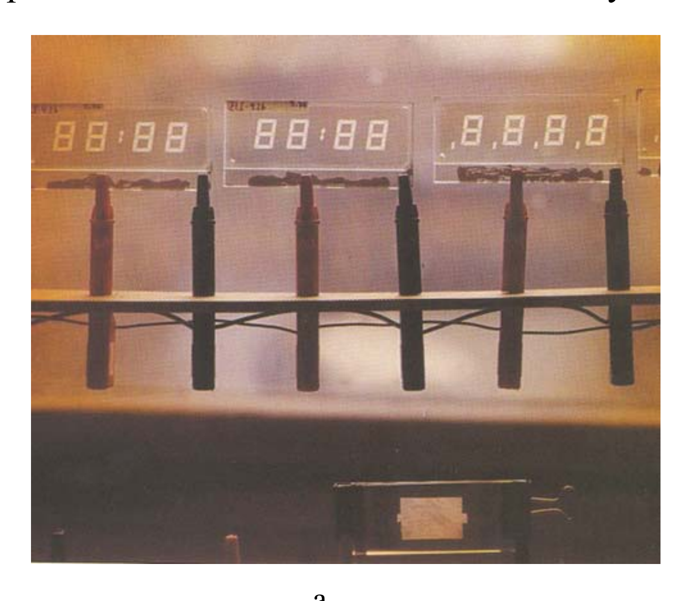
3.2. Основные этапы развития жидкокристаллических дисплеев

Появлению ЖКД предшествовал длительный период развития индикаторов. Одними из первых были стрелочные индикаторы – элементы измерительных приборов. Они не предназначались для отображения больших массивов информации в форме, удобной для оператора [33]. Изобретение ЭЛТ позволило объединить в едином корпусе источник электронов, устройства их фокусировки, отклонения и люминесцентный экран [34, 35]. Широкое применение ЭЛТ началось в послевоенный период прошлого столетия в телевидении, персональных компьютерах (ПК), радиолокаторах, бортовом оборудовании самолетов, электроизмерительных приборах, видеоиграх и др. С этого фактически началось развитие СОИ, предоставляющих оператору большие массивы информации в удобной для него форме. Это диктовалось нуждами компьютерных технологий и военной техники.

Наиболее острую потребность в дисплеях испытывала авионика – бортовая аппаратура летальных аппаратов, эксплуатируемая в жестких климатических условиях и требующая оперативного отображения информации при ограниченном весе, габаритах оборудования и малой потребляемой энергии. Первыми были разработаны механические и электромеханические устройства. Так, в 1903 г. Wright Flyer имел на борту 3 прибора: измеритель силы и направления ветра, скорости вращения пропеллера и секундомер. В период с 1930 по 1980 гг. все устройства отображения строились на использовании ЭЛТ.

Первый жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) был разработан сотрудниками фирмы RCA Г. Хейлмейром и Л. Занони в 1967 г. [36]. На

рис. 24а. показан прототип сегментного индикатора на эффекте ДРС, изготовленный по проекту Г. Хейлмейера на фирме Merck в 1971 г.[37]. В 1973 г. фирма «Шарп» использовала ЖК экран для микрокалькуляторов. Несмотря на то, что этот индикатор имел низкие контрастные характеристики, малую долговечность и узкий температурный интервал эксплуатации, он вскоре сумел заменить светодиодную индикацию в наручных электронных часах и калькуляторах (рис.24б). Однако такие ЖКИ не смогли составить конкуренции дисплеям на основе ЭЛТ, занимавшим доминирующее положение в СОИ [38]. Макет дисплея Г. Хелмейера требовал для работы высокой температуры (80°С), тем не менее, он произвел сильное впечатление на участников II международной конференции по ЖК, собравшей в 1968 г. более ста участников в университете Кента, США. Именно на этой конференции родилась идея о создании плоского телевизионного экрана, который можно было бы повесить на стену как картину.





а б

Рис.24 а: прототип сегментного индикатора на эффекте ДРС, изготовленный по проекту Г. Хейлмейера на фирме Merck; б: отечественный калькулятор 1980-х годов с ЖКИ на эффекте ДРС.

Разработка плоских дисплейных панелей началась в США в лаборатории авионики в 1969 г., и была во многом связана с развитием физики ЖК. Примерно в то же время начались работы группы Дж. Фергасона по использованию ХЖК на фирме «Вестингхауз» [39].

Мощный импульс дальнейшему развитию ЖК-дисплеев (ЖКД) дала твистовая технология, разработанная сотрудниками фирмы «Хофман Ля Рош» М. Шадтом и В. Хелфрихом [40] (рис.25). Оставалось синтезировать материал, который мог бы существовать в широком интервале температур, включая комнатную температуру, быть бесцветным и обладать химической стабильностью. Такой материал на основе цианобифенилов был разработан в 1972 г. Дж. Греем с сотрудниками в университете Хала, Велико-

британия [40]. Синтезированный материал был использован в индикаторах миллионов наручных электронных часов и калькуляторов, обеспечивая надежную эксплуатацию в интервале температур от -10 до +60°С (рис.26). Описанные индикаторы имели ограничение в адресации к большому числу элементов изображений (пикселов).

Для увеличения информационной емкости дисплеев были разработаны матричные схемы адресации, представляющие собой ортогонально размещенные токопроводящие строчки и столбцы, пересечения которых формировали отдельные пикселы (рис.27а, б). Первый активно-матричный ЖКД (АМЖКД) был изготовлен П.Броди в 1972 г., в США [34, 35]. Были стандартизированы следующие форматы: VGA – 640×480 пикселов; SVGA - 800×600 пикселов; XGA - 1024×768 пикселов; SXGA - 1280×1024 пикселов; UXGA - 1600×1200 пикселов. Основы ЖКД и в частности АМЖКД изложены в работах [42-44].



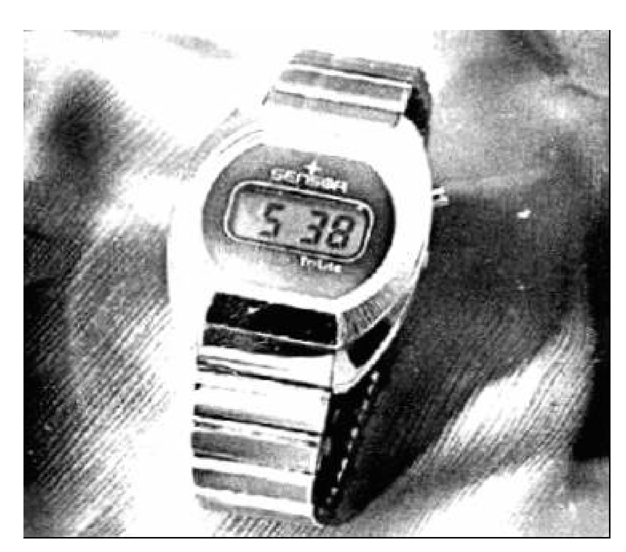


Рис.25. Первый прототип твистового ЖКД, 1972 г.	Рис.26. Наручные электронные часы с ЖКИ на основе твист-эффекта

Одной из возникших при этом проблем явилось возникновение паразитного «кросс-эффекта», состоявшего в срабатывании полувыбранных пикселов. Этот недостаток был устранен путем индивидуального включения пикселов с помощью тонкопленочных транзисторов (ТПТ).

Фишер с коллегами (фирма «Вестингхаус», США) в 1972 г. разработал первый ЖКД с ТПТ на подложке из CdSe. Создание в 1979 г ТПТ на аморфном кремнии усилиями Спиа с коллегами в университете Данди способствовало тому, что с начала 1980-х годов начался массовый выпуск полноцветных дисплеев для мониторов компьютеров. Этому способствовал синтез стабильных ЖК материалов, использование полимеров в качестве ориентирующих слоев, материалов для цветных фильтров и создание пленочных поляризаторов на основе комплексов поливинилалкилиодина.

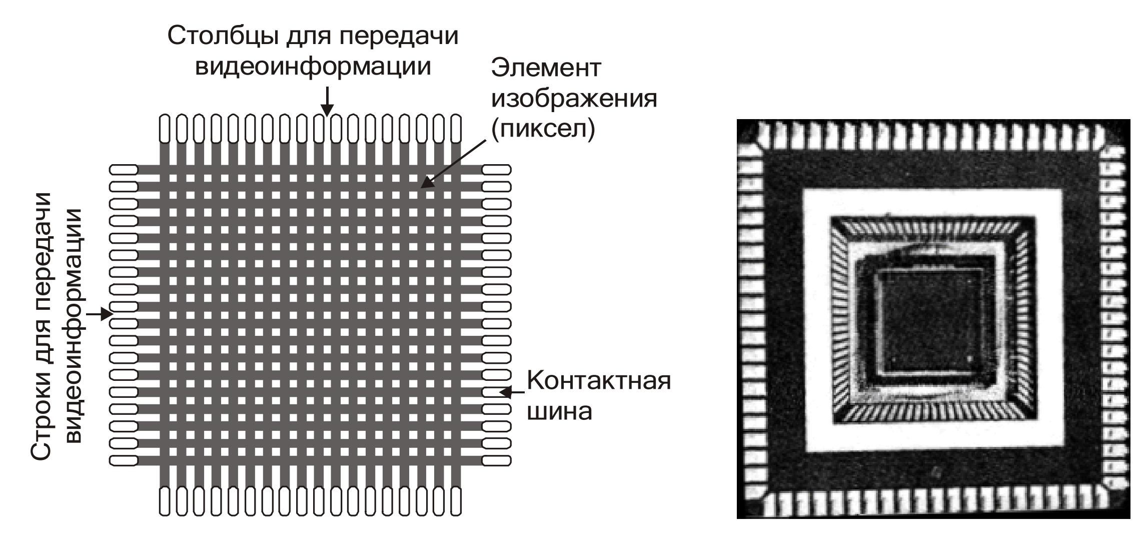


Рис.27. а – схема матричного дисплея (слева); б – реальная матричная панель с 84 контактными выводами.

Следующим шагом явилось улучшение оптических характеристик дисплеев, в частности увеличение углов обзора при сохранении контраста. В 1982 г. Ватерс и Рейнс из Деры (Великобритания) предложили для этой цели использовать супертвистовую структуру. Закрутка структуры на 240-270° вместо 90° обеспечила большие углы обзора и адресацию к сотням строк. В начале 1990-х годов цветные супертвистовые дисплеи нашли применение в качестве экранов компактных записных книжек (note-book) для персональных компьютеров (ПК) [45].

К 1992 г. активно-матричные ЖКД превзошли ЭЛТ по их использованию в кабинах военных и гражданских самолетов. Несмотря на то, что их стоимость уже превышала ЭЛТ на 25%, их надежность оказалась выше в 30 раз. Лучше оказались и другие параметры, включая угол обзора. ЖКД применяются не только для отображения информации в кабине самолета, но и в тренажерах для обучения летного состава в космонавтике, авиации, наземном и морском транспорте (рис.8.9а) [46] Особое развитие получили нашлемные дисплеи в авионике [47-68]. Они представляют собой особый вид микродисплеев индивидуального пользования, размещаемых вместе с их оптической схемой и схемой управления в непосредственной близости от глаз наблюдателя с помощью специального шлема. Пример такого нашлемного дисплея (НД) показан на рис.8.9б. Расположение шлема на голове наблюдателя предъявляет жесткие требования к габаритам и массе всей системы, удобству наблюдения и обращения и, особенно, к тому, что называют человеческим фактором. НД должны обеспечивать получение полноцветных объемных изображений.

Первые НД были разработаны для космонавтов, летчиков и пилотов вертолетов, однако удачно найденные технические решения оказались пригодными для защитных шлемов пехотинцев [68]. НД широко применятся для создания виртуальной реальности, требующей согласования ак-

комодации и конвергенции зрения. Непроизвольное проявление конвергенции, состоящее в повороте глазных осей на объект, находящийся на некотором расстоянии от наблюдателя, связано с аккомодацией, заключающейся в фокусировании глаза на объект, который может быть расположен как вблизи наблюдателя, так и на бесконечности. При работе с плоскими информационными дисплеями эта связь нарушается, поскольку 3-мерное пространство отображается на 2-мерном экране без точной передачи глубины пространства. Это приводит к дискомфорту в восприятии, вызывающему зрительное утомление, особенно с повышением качества формируемых изображений. Для согласования этих факторов было предложено несколько технических решений.

В работах [69, 70] описана система с компенсацией аккомодации за счет перемещения в реальном времени вперед-назад экранов, на которых формируются два изображения с учетом бинокулярного параллакса. Если методом траекторий определить направление визирования, то компенсацию аккомодации можно осуществить перемещением в реальном времени оптической системы. Эту же задачу можно решить, используя зеркальную систему переменного фокусного расстояния. Недостатком этих решений остается механический принцип перемещения подвижных элементов. Поэтому была предложена оптическая система на основе электрически управляемого ЖК элемента [71]. Для повышения его быстродействия было использовано двухчастотное управление. Эксперименты подтвердили возможность получения объемных изображений большого размера при удовлетворительном бинокулярном согласовании конвергенции, аккомодации и параллакса смещения.

Самостоятельной проблемой, связанной с разработкой НД, явилось совершенствование приборов ночного видения. Не вдаваясь в анализ этого направления, отметим лишь одно новшество, связанное с существенным увеличением поля зрения этих устройств. Особенность существующих приборов ночного видения состоит в том, что увеличение поля зрения достигается за счет ухудшения разрешающей способности. Для устранения этого противоречия было предложено заменить систему из 2-х электрооптических преобразователей на систему из 4-х элементов, позволивших увеличить горизонтальное поле зрения до 100° при вертикальном поле зрения порядка 40°. Достигнутое увеличение поле зрения до 160° осуществлено за счет того, что два канала обеспечили бинокулярное поле 30°×40°, а два других канала создали монокулярный обзор для левого и правого глаза с полем 35°×40°.

Стремление уменьшить вес и габариты ЭЛТ привело к созданию и развитию активно-матричных жидкокристаллических дисплеев (АМЖКД) с управлением от тонкопленочных транзисторов (ТПТ). ЭЛТ и АМЖКД в основном и определяют современное использование дисплеев.

В 1998 г. сформировался рынок настольных мониторов для ПК. Особое распространение получили дисплеи отражательного типа, однако в связи с его невысоким контрастом трудно рассчитывать на его конкурентоспособность. В настоящее время изготавливается большое семейство настольных ЖКД, характеризуемых широким углом обзора. Разработаны модули на основе твистовых нематиков со специальными пленками, мультидоменные ЖК экраны с вертикальной ориентацией и дисплеи с управлением на ТПТ и переключением в горизонтальной плоскости. Последний из упомянутых типов был впервые предложен немецкой группой Бауэра в 1992 г [72], а в 1998 г. на фирме «Мерк» для этой цели был разработан фторированный ЖК материал. С 2000 г. начался выпуск фирмой «Хитачи» таких дисплеев в виде массовой продукции.





а б

Рис.28. Применение дисплеев в авионике: а – тренажер для обучения летного состава (слева); б – нашлемный дисплей системы «Стракер» (справа) [3].

Новым в военном применении явилось появление панорамных дисплейных панелей; систем, расположенных над головой или на голове; командных систем в виде информационных стен или адаптивных панелей. 80% от всех используемых в военных целях дисплеев составляют раггедизированные дисплеи. Это означает создание возможностей использования дисплеев гражданского назначения в более жестких условиях военного применения, включая климатические и механические воздействия. До недавнего времени в командных центрах каждый оператор был оснащен 19´´ полноцветными дисплеями с разрешением 1,3 мегапиксел. Ожидается использование 10 мегапикселных панелей и информационных стен с R = 100 мегапиксел.

Современной задачей является создание быстродействующих дисплеев для многофункциональных ПК и цифрового телевидения [73, 74], а также совершенствование микродисплеев индивидуального пользования для навигационных устройств, мобильных телефонов, цифровых видео- и фотока-

мер. В 1992 г. фирмой Sharp был выпущен первый компактный ЖК экран для видеокамер (LCD ViewCam), который стал обязательным элементом для приборов среднего и высокого класса. Увеличился объем выпуска микродисплеев для мобильных компактных телефонов и цифровых видео- и фотокамер [8].

2002 год ознаменовался появлением цифровой фотокамеры фирмы Хьюлетт Паккард с первым экраном на сегнетоэлектрическом С*ЖК промышленного производства (рис.29).

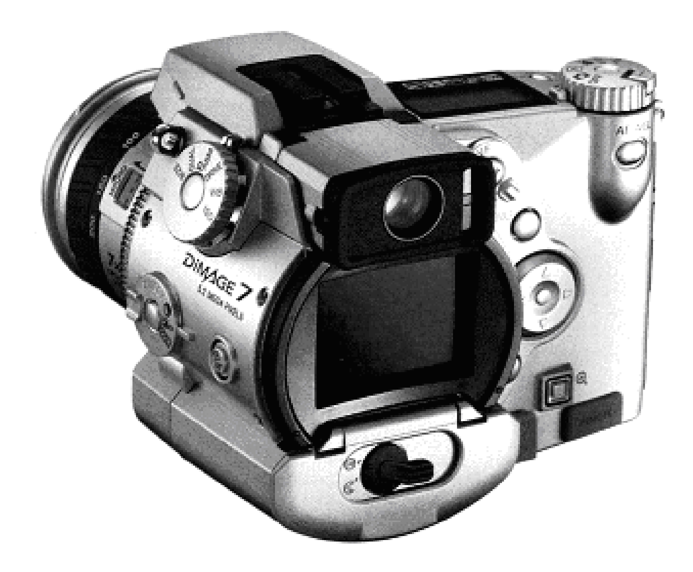


Рис.29. Цифровая фотокамера фирмы «Hewlett Packard» с первым экраном на С*ЖК промышленного производства.

Ожидается существенное увеличение размеров ТВ экранов с сохранением высокого качества изображения. В ближайшие годы следует ожидать совершенствование объемных дисплеев и появление объемного телевидения, а также общего улучшения качества отображаемой информации за счет развития передовых дисплейных технологий. Наилучшими характеристиками на сегодня обладают технологии, основанные на эффектах переключения в плоскости (IPS) и с вертикальной ориентацией молекул (VA). Анализ оптимизированных для них жидкокристаллических смесей приведен в обзоре [75]. Разработанные фтор содержащие смеси обеспечивают высокий контраст, широкий угол обзора и времена переключения порядка 16 мс (и даже 8 мс) при качественном цветном отображении информации. Это открывает перспективы создания ТВ экранов с диагональю порядка 100” и более в ближайшие годы.

Массовое производство дисплеев крупнейшими корпорациями перешагнуло национальные границы и сформировало три мировых информационных центра: европейский, азиатский и североамериканский с неким разделением функций. Европа является основным генератором новых идей. Тысячелетние традиции первых университетов, заложивших основы научного метода и фундаментальных исследований, превратили ее в инку-

батор эвристических принципов. При университетах созданы мелкие предприятия, достоинством которых является новаторский дух, воплощаемый в научные идеи, защищаемые патентным приоритетом. Слабая сторона – отсутствие инфраструктуры для массового производства продукции. Задача - продажа патентов на технологии производителю. Юго-Восточная Азия (Япония, Южная Корея, Тайвань и свободные экономические зоны Китая) со времени окончания II мировой войны превратилась в основного производителя дисплеев. Уникальное сочетание национальных особенностей с выбранным путем экономического развития превратило этот регион в центр массового производства с недостижимым в других зонах балансом цен и качества продукции.

4. ПЛОСКИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИП

В настоящее время ЖКД составляют почти 85% от объема выпуска всех плоских информационных дисплеев. Это объясняется их высокими характеристиками и конструктивным многообразием этих устройств [1, 76, 77]. Развитие ЖКД определяется острой конкуренцией различных технологий и использованием новых материалов.

Различают просветные, отражательные и полупрозрачные (прозрачно-отражательные) жидкокристаллические дисплеи (рис.30). Просветные используют заднюю подсветку для освещения ЖК экрана, обеспечивающую высокую яркость и высокое контрастное отношение. Они имеют ограниченный угол обзора и более пригодны для индивидуального пользования, например, в ноутбуках и игровых приставках.

Использование фазовых компенсаторов в просветных ЖКД прямого видения увеличивает угол обзора, что позволяет применять их в качестве экранов для настольных компьютеров и телевизоров. Просветные дисплеи могут также использоваться в качестве проекционных. Отражательные дисплеи также разделяют на дисплеи прямого видения и проекционные. Дисплеи прямого видения не нуждаются в задней подсветке, и потому являются более легкими и потребляющими меньше энергии. Их основной недостаток – трудность считывания информации при низкой освещенности. Отражательные дисплеи более пригодны для проекционного телевидения при использовании микродисплеев на кремнии (LCoS). Для них требования к углам поля зрения не столь высоки, как для дисплеев прямого видения. Полупрозрачные дисплеи объединили в себе характеристики тех и других. Так, при низкой освещенности включается задняя подсветка и дисплей работает на просвет; при высокой освещенности подсветка выключается и дисплей работает на отражение.

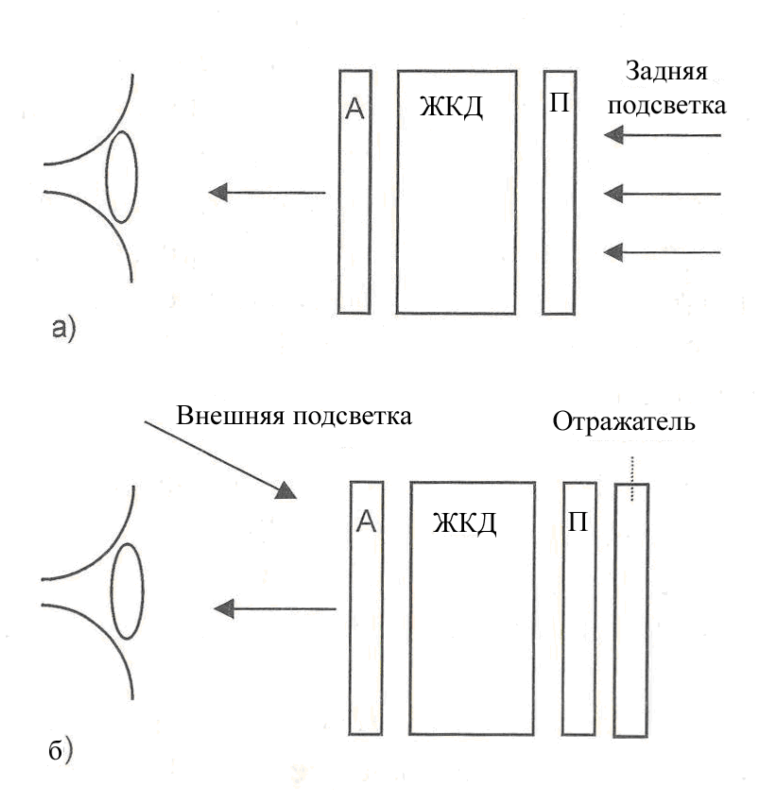


Рис.30. Схемы просветных (а) и отражательных (б) дисплеев.

В настоящей главе будут рассмотрены просветные дисплеи прямого видения, проекционные и объемные дисплеи.

4.1. Просветные жидкокристаллические дисплеи прямого видения

При разработке таких дисплеев широкое использование нашли следующие электрооптические эффекты: твист-эффект, супертвист, селективное отражение в холестерико-нематических смесях, эффекты в сегнетоэлектрических С*ЖК и бистабильные эффекты. В настоящее время наилучшие эксплуатационные характеристики достигнуты при использовании твист-эффекта с поперечным приложением электрического поля (твист, переключаемый в планаре, - IPS) и мультидоменных вертикально ориентированных мод (VA) [78].

Дисплеи на основе твист-эффекта

Наиболее широко в дисплеях прямого видения используется твист-эффект в нематиках (TN). На рис.31 представлена схема активно-матричного TN дисплея [79]. Представленная схема содержит элементы, которые имеются в различных типах ЖКД. Слой НЖК 5 толщиной около 2 мкм расположен между TFT подложкой 6 и цветным фильтром 8. На токопроводящие слои ITO 4 нанесен ориентирующий слой 7. Два скрещенных

поляроида расположены на внешней стороне дисплейной панели. Ориентация молекул НЖК задается на внутренней стороне подложек за счет натирания ориентирующего слоя в двух ортогональных направлениях. Вследствие этого в отсутствии электрического поля создается закрученная на 90° структура (твист-структура), осуществляющая поворот плоскости поляризации на тот же угол.

В скрещенных поляроидах свет проходит через такую структуру (светлое поле). При приложении электрического поля ориентация молекул НЖК становится гомеотропной, исчезает двулучепреломление слоя и структура не пропускает свет (темное поле). При повороте анализатора на 90° характер светопропускания меняется на противоположный. Детальное описание прохождения света через TN структуру приведено в главе 4 части 2 данной монографии. Время отклика зависит от толщины ячейки и отношения динамической вязкости к коэффициенту упругости K_{22} используемой ЖК смеси. Для ячейки толщиной 4 мкм время отклика при комнатной температуре составляет 20-30 мс. При напряжении на ячейке 5 В контрастное отношение равно около 400:1. Эти характеристики позволяют использовать TN дисплеи в ноутбуках.

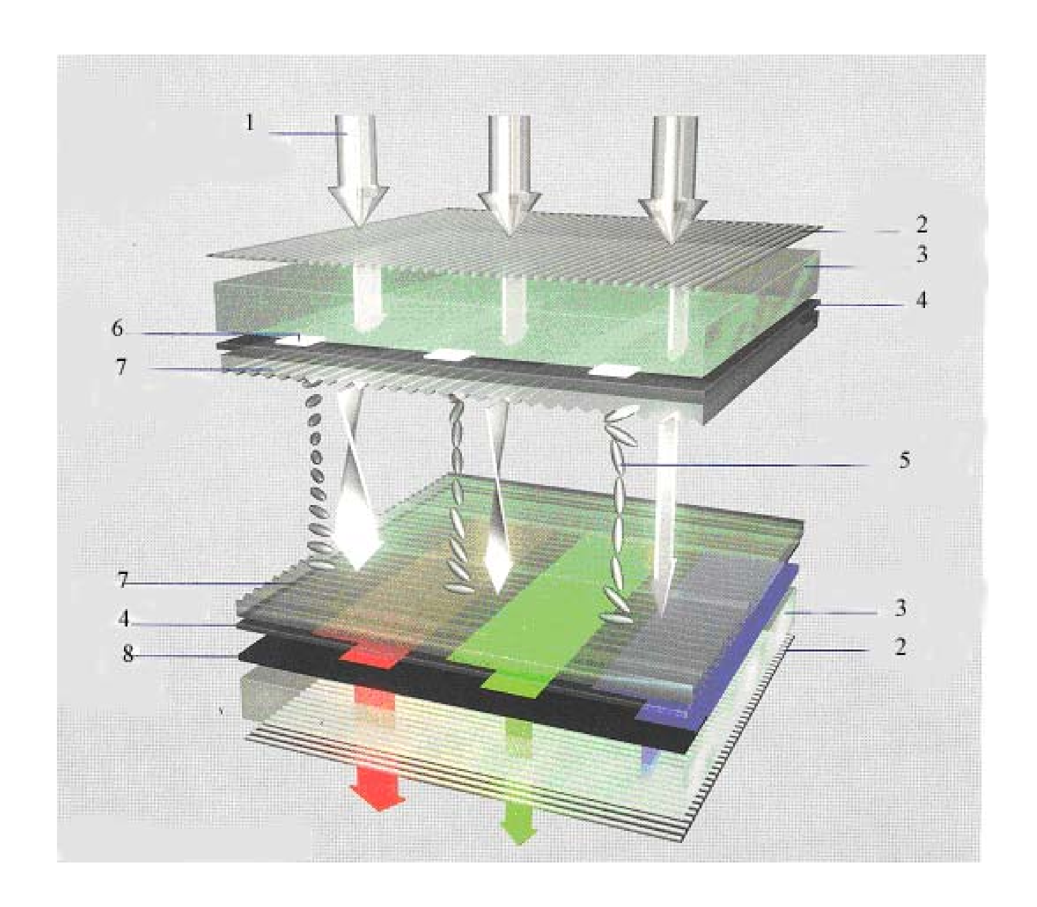


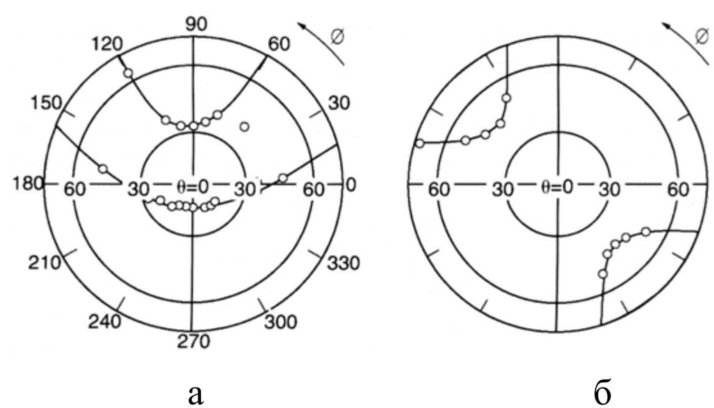
Рис.31. Схема активно-матричного TN дисплея: 1 – поляризованный свет; 2 – поляризатор; 3 – стеклянная подложка; 4 – ITO; 5 – слой НЖК; 6 – TFT; 7 – ориентирующий слой; 8 – цветной фильтр [79].

Следует отметить, что двулучепреломление слоя НЖК зависит от угла наблюдения. Это приводит к ухудшению качества изображения при увеличении углов наблюдения, что является принципиальным недостатком TN дисплеев. Выявленная асимметричность оптических характеристик пропускания и ограниченность углов обзора привели к развитию новых ЖК технологий. Тем не менее, благодаря простоте, высокой яркости и небольшому времени отклика эти дисплеи получили широкое практическое применение.

Для обеспечения больших углов обзора было разработано несколько модификаций ЖКД: супертвистовые (STN), мультидоменные TN, дисплеи на поверхностно стабилизированных хиральных смектиках (SSFLC), на антисегнетоэлектрических смектиках (AFLC) и дисплеях с оптической компенсацией двулучепреломления (OCB) [80-84].

Дисплеи на основе супертвист-эффекта

Первые супертвистовые экраны для автономных компьютеров с пассивной адресацией появились в 1985 году [80, 81]. Цветные STN дисплеи с пассивной адресацией стали использовать в миниатюрных компьютерах вместо оптически более совершенных, но более дорогих SN TFT дисплеев. Методами компьютерного моделирования было показано, что крутизну электрооптической характеристики, определяющей контраст, можно резко повысить, увеличив угол закрутки с 90° до 180°-270°. Оптимальные углы закрутки лежат в диапазоне от 210° до 270° и получаются добавлением в нематик хиральной добавки. Сравнение контраста от угла поля зрения для твистового и супертвистового дисплеев показано на рис.32. Как следует из рисунка, STN дисплей обладает большим углом обзора и более симметричной формой этой характеристики. Исследование электрооптических характеристик показало их существенную зависимость от угла поворота поляризатора β, угла наклона α, шага спирали p, толщины ячейки d, диэлектрических параметров $\gamma = \Delta\varepsilon/\varepsilon_\perp$ и отношение констант упругости K_{33}/K_{22} и K_{22}/K_{11}. Оптимальные углы наклона лежат в диапазоне от 5° до 10°.



а б

Рис.32. Зависимость контраста от угла наблюдения для твистового (а) и супертвистового дисплеев (б) [80].

Такие ячейки с оптимальными значениями α и β в мультиплексном режиме осуществляют адресацию к 240 линиям. Крутая электрооптическая характеристика ограничивает число градаций шкалы серого g, поскольку малый уровень r адресуемого напряжения приводит к малому отношению $r/\ g$ на градацию. Супертвистовая ячейка с углом закрутки 210° имеет по сравнению с ячейкой с углом 270° более пологую электрооптическую характеристику, которая позволяет проще в режиме мультиплексирования 100:1 обеспечивать 16 градаций серого.

STN ячейки имеют следующие недостатки: требуется высокая точность обеспечения величины зазора; необходимо строго обеспечивать требуемые углы наклона директора к подложке по всей ее поверхности; светопропускание в видимом диапазоне зависит от длины волны; большие времена отклика (300-400 мс). Эти недостатки в значительной степени удалось преодолеть при использовании твист-эффекта с поперечным приложением электрического поля (IPS).

Дисплеи на основе твист-эффекта с поперечным приложением электрического поля

Для обеспечения больших углов обзора была предложена схема с поперечным направлением приложенного электрического поля. Она нашла применение в TFT ЖКД в 1992 году [82]. Встречно-штыревые электроды размещены на одной подложке и создают поперечное азимутальное краевое поле, вызывая поворот директора в плоскости (рис.33).

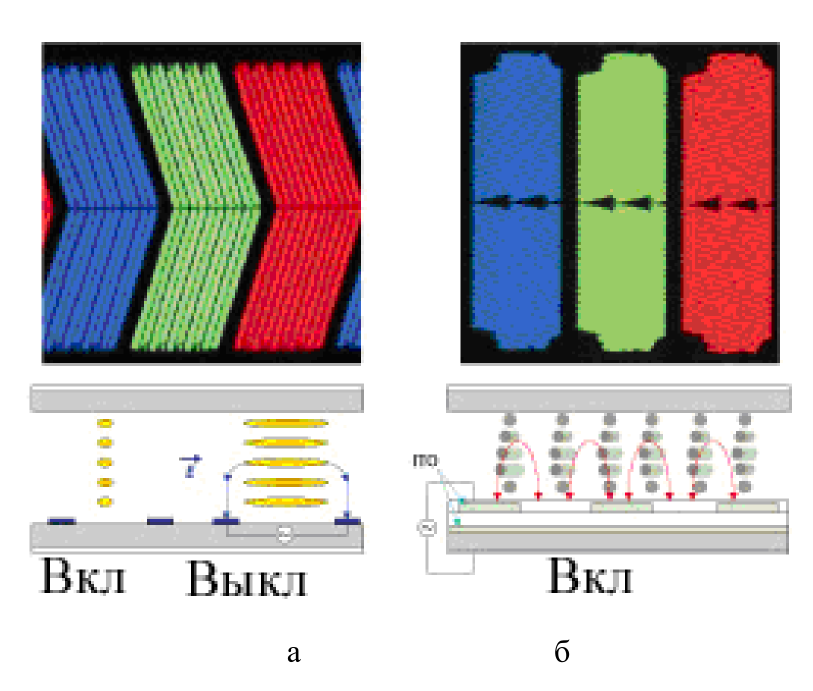


Рис.33. Микроскопические (вверху) и схематические (внизу) изображения пикселов в структурах IPS (а) и FFS (б) [78].

Эта схема управления получила название IPS (переключение в плоскости). На этом же рисунке приведена схема модифицированного варианта – FFS (с краевым электрическим полем). В ней для увеличения светопропускания IPS ячейки было предложено изготовить зазоры между электродами меньше (до 1 мкм). В этой ячейке, в отличие от IPS ячейки, величина зазора L меньше, чем толщина ячейки d. Это приводит к увеличению области твиста и росту пропускания. В главе 4 части 2 данной монографии рассмотрены физические механизмы, определяющие режимы пропускания света данной структурой. Пропускание света по нормали к однородно ориентированному слою ЖК определяется формулой:

$$T = T_0 \sin^2 2\theta(V) \sin^2[\pi d \Delta n(V)/\lambda], \qquad (14)$$

где θ – угол между оптической осью ЖК слоя и направлением поляризации; V – напряжение; d – толщина слоя; Δn – оптическая анизотропия; λ – длина волны света.

В IPS структуре угол θ и пропускание света управляется электрическим полем. При ориентации молекул ЖК параллельно плоскости поляризации света в параллельных поляроидах свет не проходит (темное состояние). Угол θ изменяется с увеличением поля и управление пропусканием (градации серого) достигается согласно формуле (9.1). Градации серого определяются только углом θ. В уравнении (9.1) первый член $T_0\sin^2[2\theta(V)]$не чувствителен к направлению наблюдения, поскольку молекулы переориентируются параллельно подложке. Вследствие этого структура IPS оказывается менее чувствительной к углу обзора, чем TN, что позволяет эффективно применять ее при больших углах обзора. Второй член, содержащий Δn и λ, слабо зависит от изменения электрического поля: при наблюдении по одной диагонали изображение приобретает желтизну, по другой – голубизну. Для компенсации этого цветового сдвига пикселям придается форма шевронов с тупыми углами (рис.9.4а). Такая структура получила название супер IPS (S-IPS).

FFS содержит два слоя прозрачных электродов, один из которых представляет собой сетку электродов, создающих краевые электрические поля (рис.33б). Эти поля осуществляют переориентацию молекул ЖК во всей области пикселя, включая ЖК на прозрачном электроде. По сравнению с IPS структурой, имеющей непрозрачные металлические электроды, FFS обладает более высоким пропусканием из-за большей апертуры и наличия краевого поля. Изготовление FFS структуры требует как минимум одной дополнительной фотолитографической операции.

Углы обзора FFS и IPS структур мало отличаются друг от друга, но значительно больше, чем в случае TN [83].

Дисплеи на основе мультидоменных вертикально ориентированных структур

В дисплеях с вертикальной ориентацией молекул (VA) используются НЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией [84]. В отсутствии электрического поля данная структура не пропускает свет. При приложении электрического поля молекулы переориентируются и структура пропускает свет. В этом случае зависимость светопропускания от поля определяется не углом θ, а эффективным двулучепреломлением $\Delta n(V)$, чувствительным к направлению наблюдения VA структуры. Эти структуры, предложенные в 1971 г., не имели большого угла обзора и не нашли практического применения. В 1990-х годах основные недостатки VA были преодолены за счет использования мультидоменных структур и компенсационных пленок [85, 86]. Это позволило обеспечить углы обзора по вертикали и горизонтали до 160° в ЖКД с TFT, высокое контрастное отношение и малые времена переключения. Схемы переключения и сравнительные характеристики дисплеев TN, IPS и VA приведены на рис.34 и в таблице 3.

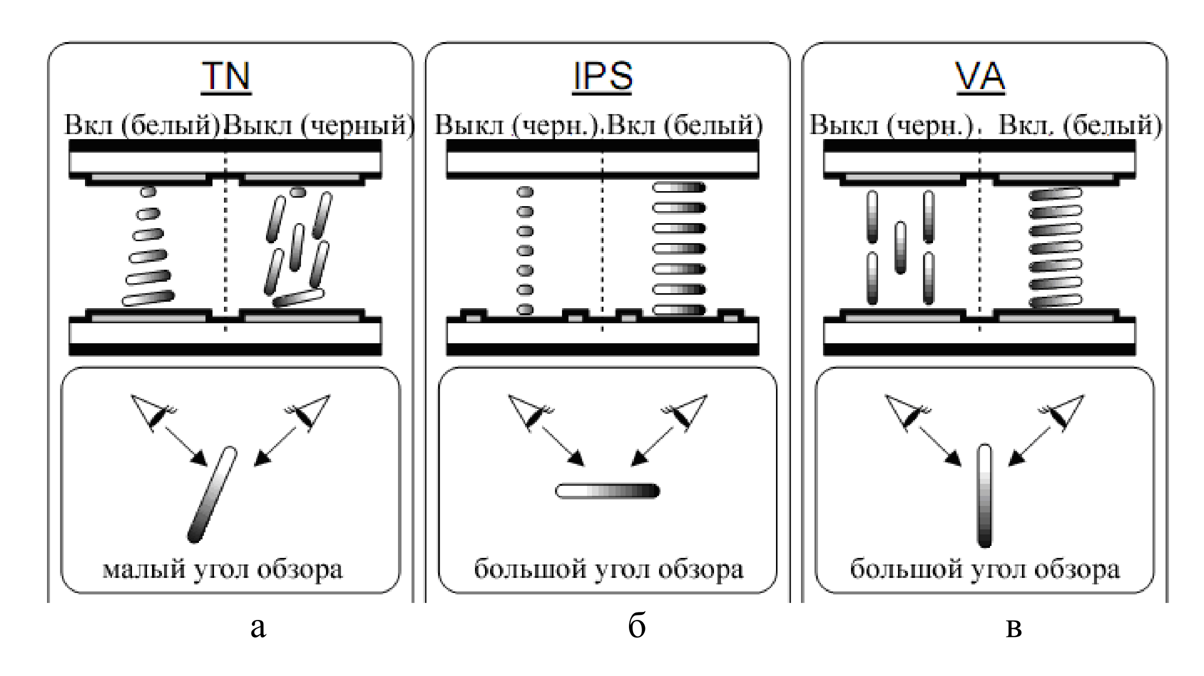


Рис.34. Схемы переключения в различных дисплеях: а – TN, б – IPS, в – VA [86].

В TN ЖКД даже при подаче максимального напряжения молекулы ЖК ориентированы не совсем перпендикулярно подложкам (рис.34а). Поэтому структура не становится полностью темной. Кроме того, при подаче промежуточного напряжения различные полярные ориентации молекул создают различные изображения для разных углов наблюдения. Это приводит к тому, что наблюдатель под всеми углами (за исключением нормали) видит недостаточно четкое и правильное изображение. В IPS ЖКД мо-

лекулы поворачиваются параллельно подложках при любых значениях напряжения, что устраняет проблему малых углов наблюдения, вызванную наличием полярных углов ориентации молекул. Однако времена переключения этих структур не являются удовлетворительными, поскольку переориентация молекул происходит при воздействии слабых полей, создаваемых парой планарных электродов. В VA ЖКД в отсутствии поля все молекулы, включая находящиеся на подложке, ориентированы вертикально, и тогда свет при скрещенных поляроидах полностью не проходит. Наблюдатель под разными углами видит темное поле. Достоинством данного дисплея является малые времена переключения, обусловленные в отсутствии твистовой структуры простым переключением ориентации из вертикальной в горизонтальную.

В традиционной монодоменной VA технологии однородный наклон молекул обеспечивает получение промежуточных градаций серого (рис.35а). В связи с однородной ориентацией молекул яркость зависит от угла наблюдения. При наблюдении по нормали из-за наклона молекул проходит только часть света вследствие эффекта двулучепреломления. Если наблюдать ячейку в направлении наклона молекул, то двулучепреломление исчезает и видно темное поле. При наблюдении в направлении нормали к наклону, двулучепреломление достигает максимума, и яркость становится наибольшей. С целью устранения зависимости яркости от угла наблюдения была разработана мультидоменная технология. На рис.35b показана структура с одинаковым наклоном молекул влево и вправо. При малых размерах этих доменов однородная яркость создается для широких углов обзора. Математическое моделирование показало, что для оптимизации таких оптических характеристик как контрастное отношение, цветность, яркость для различных углов следует иметь, по крайней мере, четырех доменную структуру.

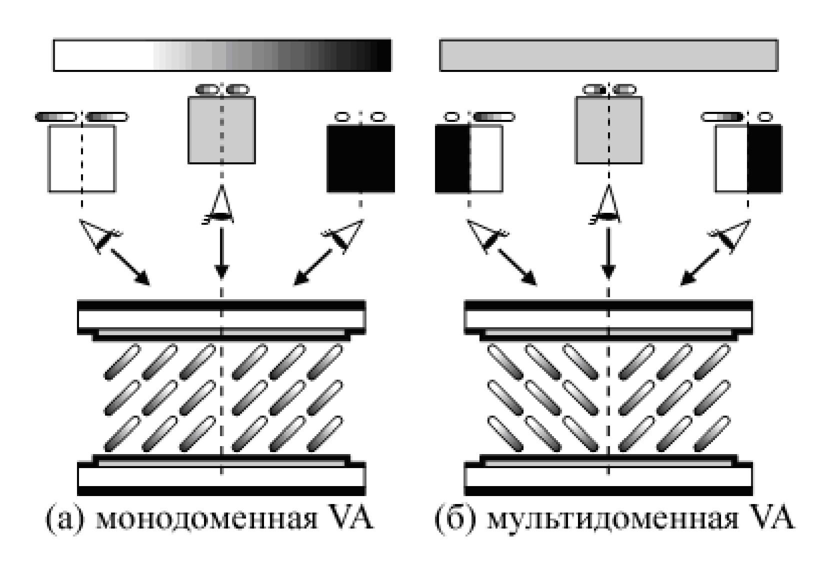


Рис.35. Моно- (а) и мультидоменная (б) ориентации [86].

Для формирования четырех доменных структур использовались два способа: создание выступов (MVA) и впадин (PVA) на электродах, обеспечивающих наклон молекул на подложке. Технологии получения S-PVA и MVA структур описаны в работах [87, 88]. Особенностью этих технологий является отсутствие операции натирания, что упрощает изготовление и делает MVA TFT более стабильными. На рис.36 приведена схема с выступами.

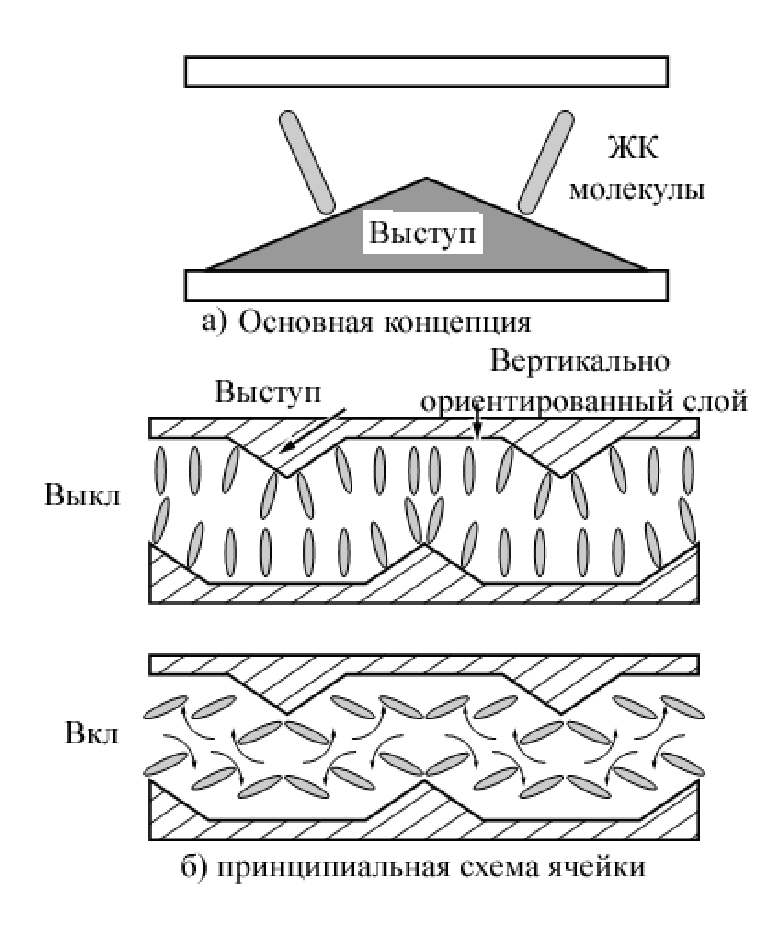
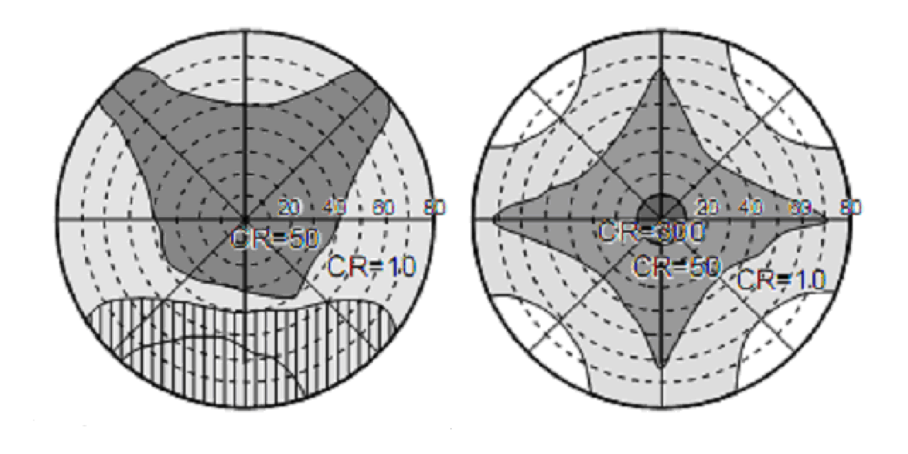


Рис.36. Принцип работы MVA ЖКД [86].

Этот способ обеспечивает надежное формирование доменов, поскольку наклонные электрические поля совпадают с соответствующей ориентацией молекул на поверхностях выступов. В этом случае ЖК молекулы автоматически разделяются на две ориентации, формирующих два домена с противоположными визуальными характеристиками, создавая тем самым ячейку с широким углом обзора. Технология позволяет за счет изменения конфигурации и периодичности выступов на обеих подложках легко менять параметры доменов. С использованием шевронной конфигурацией выступов была создана четырех доменная структура MVA ЖКД [85]. Характеристики углов обзора этой структуры симметричны для вертикального и горизонтального направлений и составляют величину более 160°, в диапазоне этих углов контрастное отношение – 30:1 (рис.37).



: область инверсии шкалы серого

Рис.37. Углы обзора VA и MVA ЖКД: слева – монодоменный VA ЖКД; справа – 4-доменный MVA ЖКД.

Инверсии градаций шкалы серого, которая является главной проблемой в обеспечении качества изображения, не наблюдается в мультидоменных ЖКД. Дальнейшее совершенствование дисплеев было связано с разработкой супер-PVA структуры (S-PVA) с восемью суб-доменами (рис.38) [78].

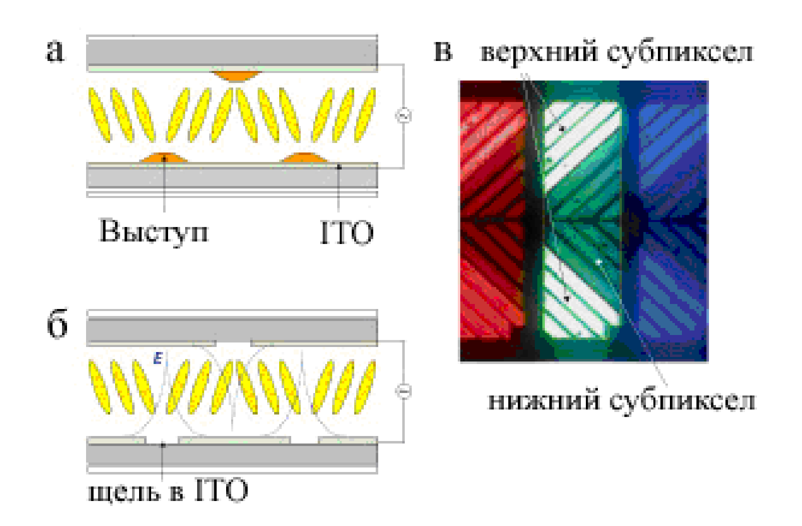


Рис.38. Структуры MVA (а), PVA (б) и микроскопическое изображение восьми доменной структуры (в) [78].

Для обеспечения плотности черного в изображении под углом к нормали в диагональном направлении для TN, IPS и VA дисплеев используют компенсирующие пленки. На рис.39 показаны изоконтрастные кривые для TN дисплеев без компенсирующей пленки и с ней. По направлению нормали TN дисплей обеспечивает высокое контрастное отношение,

однако оно резко уменьшается по направлению вверх и по диагонали вниз. По вертикали вниз контрастное отношение остается высоким, однако шкала серого испытывает инверсию (не показано на рисунке). Использование однородной по фазе компенсационной пленки не позволяет внести корректировку в верхнюю и нижнюю части одновременно. Поэтому используют две пленки для верхней и нижней части. Фирма Фуджи Фото разработала пленки на основе дискотических ЖК для расширения угла обзора [89].

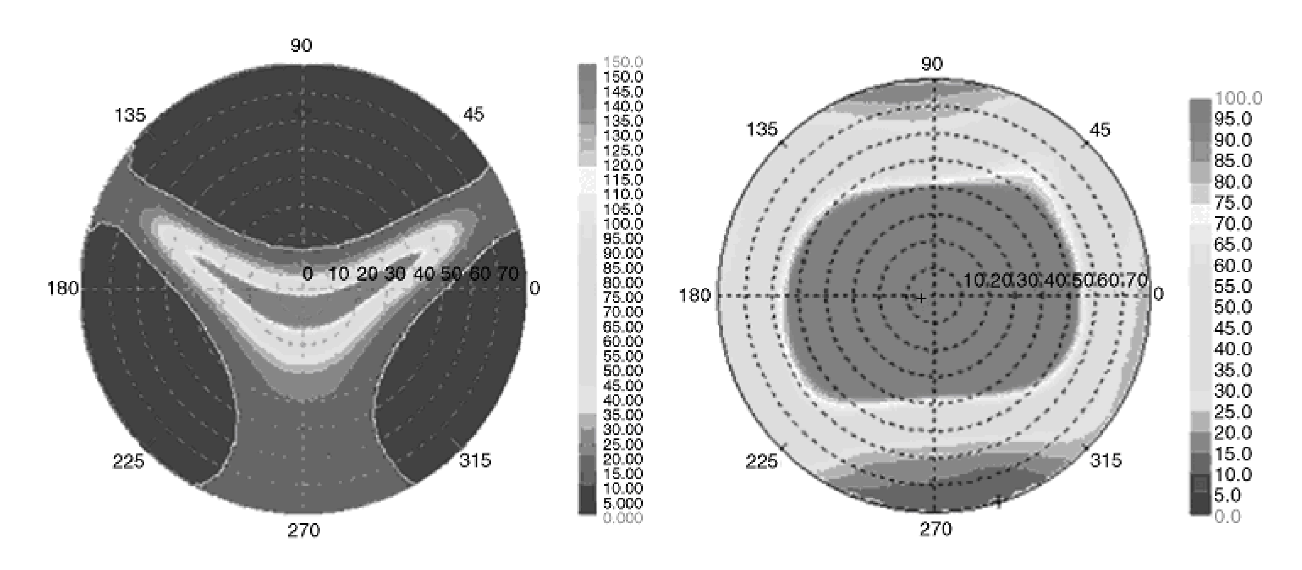


Рис.39. Изоконтрастные кривые для TN дисплеев без (слева) и с (справа) компенсирующими пленками [89].

В IPS дисплеях максимальный полярный угол, при котором контрастное отношение между белым и черным превышает 10:1 равен 60°. Этот недостаток можно устранить использованием двуосных компенсирующих z-пленок с эллиптически изменяющимся показателем преломления $n_x>n_z>n_y$ и $(n_x–n_z)/(n_x–n_y)≈0.5$, где z – ось, направленная по нормали к пленке, x и y – оси в плоскости пленки [90]. В VA дисплеях применение компенсирующих пленок позволяет при том же контрасте увеличить угол до 89°.

Завершая рассмотрение ЖКД с большими углами обзора, следует отметить использование для той же цели эффекта «гость-хозяин». При добавлении в нематик флуоресцентного красителя удалось создать TN дисплей, обладающий также эмиссионными свойствами с углом обзора почти до 180° [91]. Эта технология пока не получила развития, однако не исключена возможность ее использования в будущем.

Способы улучшения характеристик дисплеев прямого видения

Для улучшения качества изображения ЖК дисплеев необходимо увеличивать угол обзора, уменьшать смазывание изображения, повышать контраст и расширять цветовую гамму. Пути увеличения углов обзора бы-

ли рассмотрены выше. Качество изображения движущихся объектов определяется временем отклика ЖК, связанного с поворотом молекул, и временем формирования кадра на экране, обновляемого с определенной частотой. Время поворота молекул НЖК составляет десятки миллисекунд, что сопоставимо со временем обновления кадра. Для уменьшения времени отклика необходимо оптимизировать выбор ЖК материала, толщину ячейки, конструкцию пикселя, форму электрода и режимы управления. ЖК материалы выбираются с минимальной вязкостью. Для IPS дисплеев ЖК с $\Delta\varepsilon > 0$ имеют вязкость 50-60 мпз; для VA дисплеев – 100-110 мпз. Толщина слоя ЖК в IPS дисплее - менее 4 мкм, в VA дисплее – 10 мкм, поэтому времена отклика этих дисплеев примерно равны. Время отклика τ также определяется приложенным напряжением: $\tau \sim 1/(V_{пр}-V_{п})^2$, где $V_{пр}$ – приложенное к ячейке напряжение; $V_{п}$ – пороговое напряжение. Оптимизация режимов управления для TFT-ЖКД описана в работе [92]. Для VA дисплеев время отклика также можно уменьшить заданием преднаклона молекул ЖК [93]. Использование методов импульсного управления задней подсветкой и увеличение частоты обновления кадра позволили обеспечить уменьшение смазывания и мелькания движущихся объектов до уровня ЭЛТ.

Контрастное отношение, определяемое как отношение освещенностей светлого и темного, является одним из основных критериев качества изображения. Типичные телевизионные ЖКД имеют яркость примерно 500 кд/м^2 и контрастное отношение 1000:1. Это означает, что яркость темного поля равна 0,5 кд/м^2, что недостаточно темно для черного изображения. Недавно для IPS дисплеев было получено за счет улучшения процесса натирания и использования материалов с малым светорассеянием контрастное отношение 1500:1. В VA дисплеях очень темное состояние достигнуто в отсутствии поля в связи с нулевой фазовой задержкой. В MVA из-за наклона молекул в области выступов происходит рассеяние света, поэтому для его уменьшения выступы должны иметь плавную форму. В PVA, имеющих впадины в токопроводящем слое, светорассеяние мало и контрастное отношение достигает значений 10.000:1. Определенные резервы для увеличения контраста имеются в уменьшении размеров частиц цветовых пигментов и уменьшения отражения света от поверхности поляризаторов. Уменьшением яркости темных и увеличением яркости светлых зон в изображении контрастное отношение может быть увеличено до 150.000:1 и даже 1.000.000:1 при использовании флуоресцентных ламп с холодным катодом и светодиодов соответственно.

К общим недостаткам дисплеев прямого видения относится утомляющий взгляд серый фон, причем это ощущение возрастает при низком внешнем освещении. Этот недостаток можно в значительной степени устранить, если ввести в ЖК флуоресцентный краситель, который превращает ЖКД в частично излучающий в угле 180° дисплей. Этот эффект был экс-

периментально подтвержден при использовании ряда красителей из ряда перилин эфиров хромофоров [94].

Одной из проблем в обеспечении качества изображений является точное воспроизведение цветов. Эта задача решается использованием цветовых фильтров и источников задней подсветки с определенными спектральными характеристиками. Основой фильтра является подложка с наполнителем в виде красителя, цветовые характеристики которого определяют качество изображения. В последнее время используемые в дисплеях красители были заменены цветовыми пигментами, обладающими большей тепловой стойкостью и долговечностью. Однако оказалось, что они могут образовывать молекулярные скопления размером до нескольких сотен нанометров, которые вызывают светорассеяние и уменьшение контрастного отношения. Поэтому разработчики вновь обратились к использованию красителей с улучшенными характеристиками по светопропусканию. Следует заметить, что к производству дисплеев стали предъявляться требования по использованию экологически безопасных «зеленых» технологий, ограничивающих использование вредных материалов. Перспективными являются новые технологии, использующие печатные операции вместо фотолитографии и потребляющие меньшую энергию. Одним из таких направлений является создание бистабильных дисплеев.

Бистабильные дисплеи

Бистабильные дисплеи (БЖКД) привлекли внимание разработчиков за свойство сохранять изображение без потребления энергии после переключения и сверхмалую потребляемую энергию, например, от миниатюрных солнечных батарей. Они не нуждаются в использовании TFT для управления и имеют низкую стоимость. Возможно изготовление на гибких подложках при обеспечении качества изображений [88]. В БЖКД используются эффекты объемной и поверхностной бистабильности в ЖК. Объемный бистабильный эффект был впервые изучен в ХЖК [95]. При отсутствии поляризаторов планарная структура ХЖК эффективно отражает свет, а при переключении под действием электрического поля в конфокальную структуру становится прозрачной (рис.40а, б, с). Максимум отражения происходит на длине волны, равной шагу холестерической спирали (рис.40в). Достоинством дисплея является высокий коэффициент отражения (до 40% для монохромного излучения), низкая стоимость и отсутствие мельканий при отображении информации. Бистабильные отражательные дисплеи на ХЖК не нуждаются в задней подсветке [96]. К недостаткам относятся малое быстродействие, сложность получения цветного изображения, возможность уменьшения контраста при механических воздействиях и необходимость в использовании специальных схем управления. В [97] описан бистабильный дисплей на ХЖК со структурой, стабилизированной

полимером. Оптимизации параметров отражательных бистабильных ХЖК с низким управляющим напряжением посвящена работа [98].

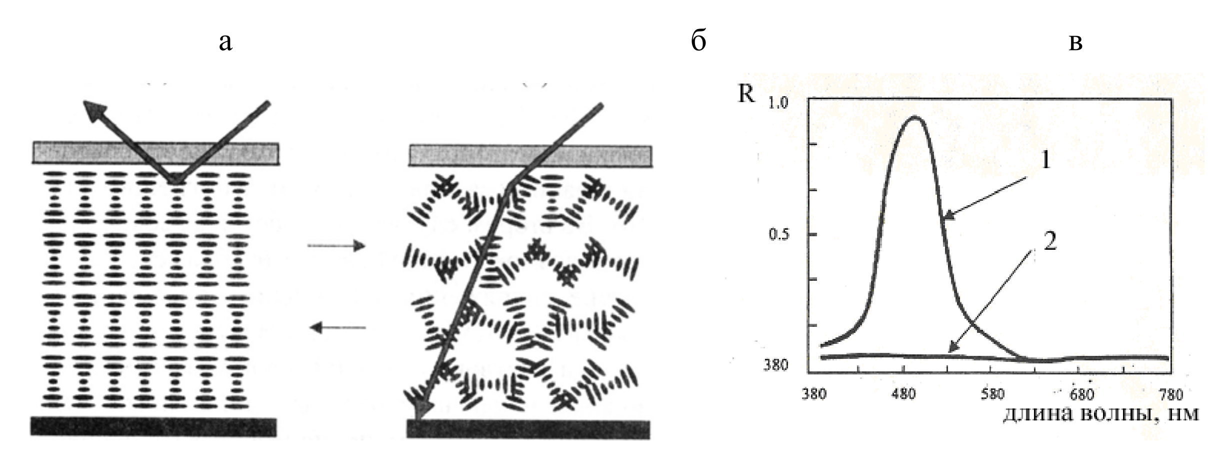


Рис.40. Объемная бистабильность в холестерике: а – планарная рассеивающая структура; б – конфокальная прозрачная структура; в - максимум отражения происходит на длине волны, равной шагу холестерической спирали; с – зависимость коэффициента отражения от длины волны: – планарная 1 и конфокальная 2 структуры.

Эффекты бистабильности в НЖК описаны ранее в настоящей работе (гл.4, часть 2). Бистабильное переключение моды продольного изгиба к моде поперечного изгиба в НЖК происходит при большом угле наклона (45°), оптимальном выборе констант упругости ЖК и его толщины. При этих условиях обеспечивается объемная зенитальная (полярная) бистабильность. Технически это достигается использованием наклонных поверхностей подложки. Недостатком является невозможность мультиплексирования.

Бистабильная твист-ячейка в НЖК впервые была описана в [99]. Она отвечала основным требованиям, предъявляемым к пассивным матричным дисплеям с малой потребляемой энергией. ЖК материалом был нематик с хиральной добавкой для обеспечения отношения зазора d к шагу закрутки p d/p=0,5. Подложки натирались в противоположных направлениях для создания на них одинакового угла наклона. При этих условиях возможно возникновение твистовых структур с закруткой 360° [80, 100, 101] и 180° [102], показанных на рис.4.15. В первом случае обеспечиваются малые времена переключения (30 мс при напряжении 20 В) и малые напряжения (1,5 В). К недостаткам относится невозможность запоминания изображения и необходимость обеспечения малого зазора в 1,5 мк с точностью 50 нм. Во втором случае достигается высокий контраст и возможно запоминание изображения в отсутствии напряжения. Необходимо обеспечивать малый зазор в 1,5 мк, избегать опасной зоны ориентации и жертвовать шкалой серого. Указанные ограничения исключают использование гибкой подложки. Областью применения могут быть дисплеи для мобильных те-

лефонов. В работе [103] описан эффективный способ бистабильного переключения двухчастотного нематика.
ЖКД на основе поверхностной бистабильности нематика основаны на азимутальной или зенитальной переориентации молекул. В первом случае используется монокристаллическая поверхность с би-решеткой, нанесенной в двух ортогональных направлениях. Во втором случае - моно решетка с одним направлением. Азимутальная бистабильность поверхности за счет флексоэлектричества приводит к возникновению мод продольного или поперечного изгиба [104]. Достоинством структур является большой угол обзора, недостатками – слабый флексоэлектрический эффект, возможная азимутальная разориентация и сложность контроля профиля поверхности. Рельефная поверхность, покрытая ориентирующим слоем для создания гомеотропной ориентации, может создавать наклонные бистабильные структуры, когда оптимизированы шаг и глубина канавок [105]. Рельеф получают контактной фотолитографией, методом интерференции, механическим натиранием. Различная ориентация осуществляется в зависимости от глубины профиля: возникает различие в упругой энергии слоев ЖК. Это позволяет создать два типа устройств с устойчивым сохранением изображения при обычных размерах зазора (5 мк для 1-го максимума, 10 мк – для второго при допуске ±0,2 мк), с коэффициентом отражения 35% и возможностью мультиплексирования. Дисплеи не нуждаются в TFT, используют малое напряжение и могут изготовляться на гибкой полимерной подложке.

Недостатками являются ограниченный диапазон шкалы серого и малое быстродействие для отображения движущихся объектов. Описанная технология из-за низкой стоимости перспективна для применения в автономных переносных устройствах: мобильных телефонах, электронных записных книжках и книгах.

При создании бистабильных дисплеев на С*ЖК, возможны две модификации (рис.41) [106].

Дисплеи первого типа имеют высокую яркость и просты в изготовлении. Но они требуют высокого напряжения, имеют невысокое быстродействие и подвержены двоению изображений. Дисплеи второго типа обладают большим быстродействием и требуют меньшего напряжения. Для получения высокой яркости требуется стабилизация напряжения и использование специальных приемов ориентации. В полноцветном макете разработки фирм Sharp и Dera с диагональю 17” достигнуты высокое быстродействие и разрешение (720×916) после отладки технологии ориентации и обеспечения малого зазора (1,5 мк). Дисплеи этого типа без принятия специальных мер чувствительны к ударам и имеют узкий температурный интервал эксплуатации (70°).

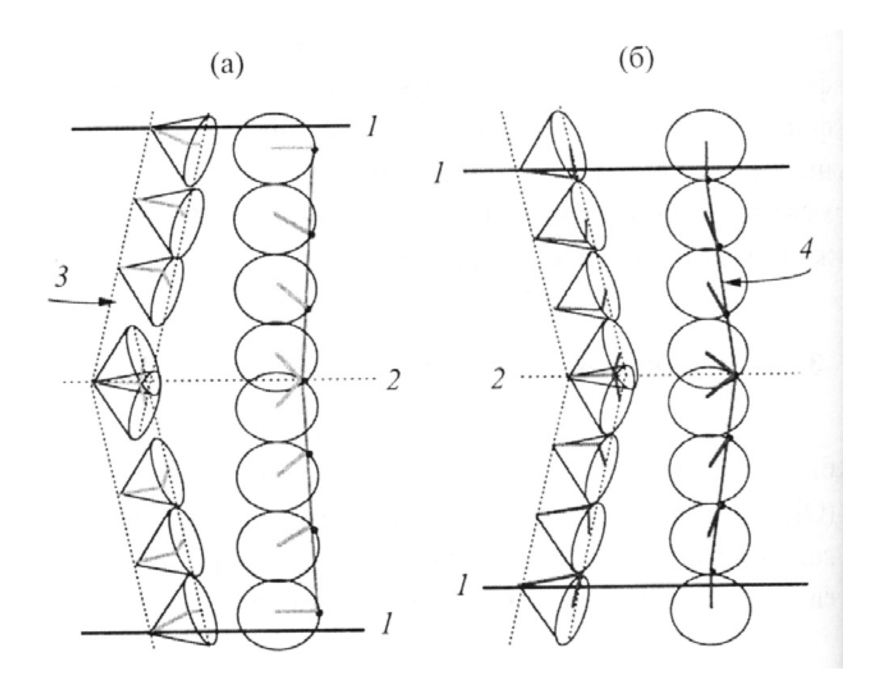


Рис.41. Бистабильные модификации в С*ЖК: а – структура с углом наклона слоев, совпадающим с углом наклона молекул на поверхности; б – структура с углом наклона слоев, ортогональным приповерхностному наклону молекул. 1- поверхность, 2 – граница шевронов, 3 – смектические слои, 4 – угол закрутки директора.

Оценивая перспективы развития дисплеев прямого видения, следует ожидать повышения их быстродействия для многофункциональных персональных компьютеров и цифрового ТВ. Времена переключения должны быть менее 5 мс, что почти в 3 раза меньше времени переключения современных дисплеев. В дальнейшем ожидается создание более информативных дисплеев, которые будут иметь аббревиатуру A-HIC LCD и размеры пикселов порядка 126 мкм с промежутком 42 мкм. Это будут функциональные пикселы нового типа, работающие от малых напряжений, более быстродействующие и обладающие эффектом памяти. Но уже в наши дни Ч. Розенблатт с сотрудниками (Кливлендский университет, США) получил черно-белое изображение на ЖК со сверхвысоким разрешением. С помощью атомно-силового микроскопа создан пиксел размером в 1 мкм.

4.2. Отражательные жидкокристаллические дисплеи прямого видения

Разработаны два типа отражательных дисплеев (ОЖКД): прямого видения и отражательные. В дисплеях прямого видения для считывания информации используется внешний свет, в проекционных – дуговые лампы или яркие светодиоды для проецирования изображения на большой экран. Дисплеи прямого видения, которым посвящен настоящий раздел, обычно применяются в игровых приставках, для рекламы и некоторых мо-

бильных телефонах. Отражательные дисплеи малых размеров (ЖК микродисплеи) также перспективны для создания больших информационных экранов и отображения виртуальной информации.

В ОЖКД используется несколько механизмов модуляции света. Они могут быть условно классифицированы по числу используемых поляризаторов, что существенно определяет светотехнические характеристики устройства. В ЖК ячейке, расположенной между двумя ортогонально ориентированными линейными поляризаторами, используется твистовый нематик с закруткой на 90°. Такая структура широко применялась в просветных дисплеях благодаря высокой световой эффективности, малым цветовым искажениям, высокому контрастному отношению и низкому управляющему напряжению. В ОЖКД используется ряд электрооптических эффектов: MTN - комбинация эффектов вращения плоскости поляризации и двулучепреломления; супертвист (STN); изменение фазовой задержки в гомеотропной или гомогенной ячейке. При использовании поляризатора достигаются высокое контрастное отношение и насыщенные цвета, но при этом ухудшается светопропускание. В случае использования эффектов поглощения («гость-хозяин»), рассеяния света в PDLC и брэгговского отражения в ХЖК поляризаторы не требуются. Высокая яркость и большой угол обзора являются достоинством таких дисплеев, однако контрастное отношение для них не превышает величины 10:1. В настоящем разделе мы ограничимся рассмотрением наиболее перспективных с нашей точки зрения типов ОЖКД: отражательного дисплея на ХЖК и структур с вертикальной ориентацией (VA), с планарной ориентацией и компенсирующей пленкой, а также твистовый нематик (MTN). Для изучения свойств отражательных дисплеев, основанных на других электрооптических эффектах, рекомендуется обратиться к специальной монографии [107] и обзору [108].

Схема отражательного дисплея на эффекте брэгговского отражения в ХЖК приведена на рис.42.

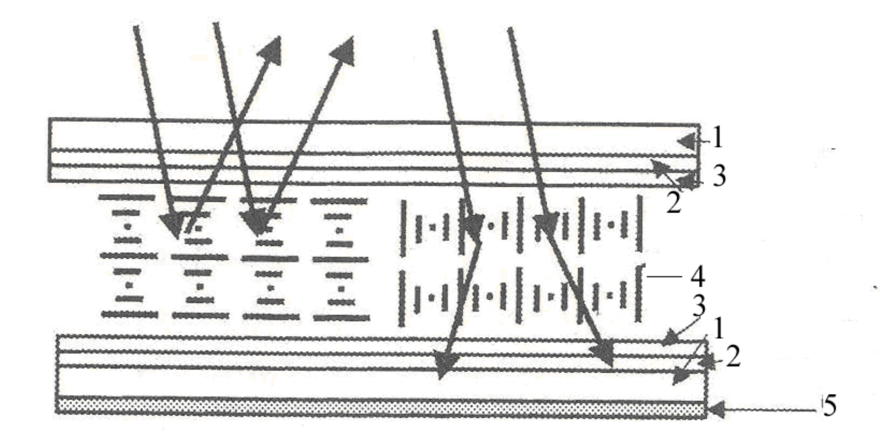


Рис.42. Схема отражательного дисплея на ХЖК: 1 – подложка; 2 – прозрачные электроды; 3 – ориентирующие слои; 4 – слой ЖК; 5 – цветной поглощающий слой.

Планарная структура холестерика вызывает брэгговское отражение света определенной длины волны. При приложении напряжения она переходит в конфокальную структуру и рассеивает свет. Для достижения высокого контраста необходимо, чтобы обратное рассеяние света от конфокальной структуры было минимальным. Для этого на заднюю подложку наносится цветной поглощающий слой.Для черно-белого дисплея используется черный поглощающий слой. Дисплей дает яркий цвет в случае планарной структуры ЖК и выглядит черным, когда структура конфокальная. Для белого дисплея используется цветной поглощающий слой. Например, ЖК с планарной структурой отражает желтый цвет, а поглощающий слой – синий, и дисплей выглядит белым. В случае конфокальной структуры только синий цвет отражается от поглощающего слоя и ЖКД выглядит синим. Отражение ХЖК зависит от толщины ячейки. Для планарной структуры достаточна толщина в 3 мкм. Для обеспечения насыщенного отражения для ЖК с $\Delta n \geq 0{,}2$ также рекомендуется толщина 3 мкм. Для ХЖК на основе PDLC – толщина 5мкм. В полимер стабилизированных бистабильных ХЖКД холестерик смешивают с несколькими процентами мономера. Вязкость смеси невысока и ею заполняют ячейку в вакууме и освещают УФ для фотополимеризации мономера. В поверхностно стабилизированном бистабильном ХЖКД используют либо слабую гомогенную, либо гомеотропную ориентацию. В случае гомеотропной ориентации конфокальная структура выглядит темной и время отклика короче, хотя отражение от планарной структуры слабее. Недостатком ХЖКД зависимость длины волны отраженного света от угла наблюдения. Если свет падает на совершенную планарную структуры, то наблюдение возможно только при зеркальном отражении. Эти проблемы частично решаются созданием полидоменной структуры при добавлении в ЖК небольшого количества полимерного материала или нанесением ориентирующего слоя, дающего не высококачественную гомогенную или гомеотропную ориентацию. Несовершенная планарная структура отражает падающие под определенным углом лучи от разных доменов в различных направлениях (рис.43a). Лучи, отраженные от различных доменов, могут сходиться в одной точке (рис.43b). Поскольку наблюдаемый свет представляет собой смесь различных цветов, то цвета, наблюдаемые под разными углами, не сильно отличаются. Полидоменные структуры улучшают углы обзора ХЖКД. Кроме того добавление полимера и ориентирующие слои стабилизируют конфокальную структуру в отсутствии поля. Дисплеи, стабилизированные полимером, называют полимер стабилизированные ХЖКД, а стабилизированные ориентирующим слоем – поверхностно стабилизированные ХЖКД.

ХЖКД позволяют обеспечивать градации шкалы серого несмотря на бистабильность структуры холестерика. Это объясняется наличием мультидоменной структуры: при приложении электрического поля разные до-

мены из планарной структуры переходят в конфокальную при различных напряжениях.

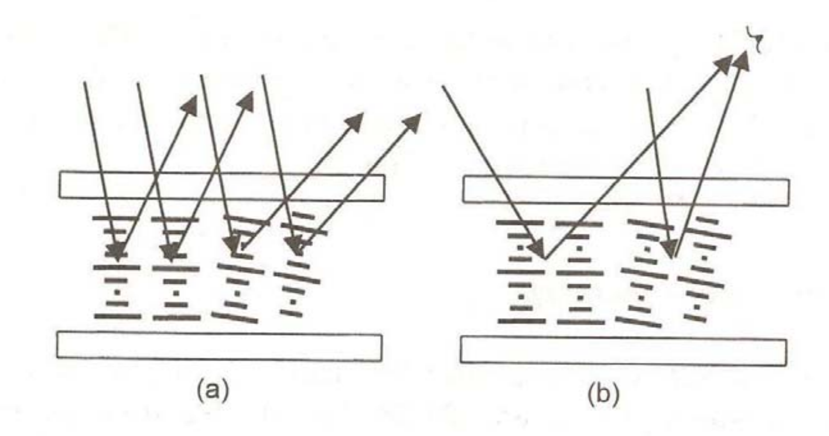


Рис.43. Отражение света от полидоменной планарной структуры [109].

В ХЖКД на основе одного холестерика может быть получен только один цвет. Для получения многоцветного дисплея используют три ХЖК с различным шагом спирали, обеспечивающих получение красного, зеленого и синего цветов. Это осуществляется либо использованием трех слоев различных холестериков, либо использованием одного слоя, разделенного на части, с тремя различными по шагу ХЖК [109].

Отражательные дисплеи могут быть созданы на основе ХЖК, диспергированных в полимере (например, в виде капель в полимерной матрице). В отсутствии электрического поля структура определяется граничными условиями и размерами капель. Такая структура слабо рассеивает свет. При приложении поля для ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией происходит переход в планарную структуру, отражающую свет. Поскольку величина отрицательной диэлектрической анизотропии обычно мала, необходимо прикладывать высокое напряжение. В малых каплях ХЖК не обладает бистабильностью.

Принципиальная схема отражательного дисплея прямого видения, использующего механизмы изменения фазовой задержки и вращения плоскости поляризации, показана на рис.44. Поляризатор и четвертьволновая пластинка являются аналогом скрещенных поляризаторов. Ребристый рефлектор диффузно рассеивает отраженное к наблюдателю излучение. Под рефлектором размещаются элементы TFT. ОЖКД имеет большое апертурное отношение (~90%). Светоблокирующий слой (LBL) используется для поглощения света от соседних пикселей.

В отражательных и полупрозрачных дисплеях используются три основных типа ячеек: с вертикальной ориентацией (VA), с планарной ориентацией и компенсирующей пленкой, твистовый нематик (MTN) [109]. В ячейках с вертикальной и планарной ориентацией используется эффект фазовой задержки, а в MTN – комбинация эффектов вращения плоскости

поляризации и двулучепреломления. В ОЖКД толщина слоя ЖК в два раза меньше, чем в просветных дисплеях, так как свет дважды проходит через этот слой. В полупрозрачных дисплеях используются чаще всего VA ячейки с компенсирующей пленкой, обеспечивающие высокое контрастное отношение и большой угол обзора.

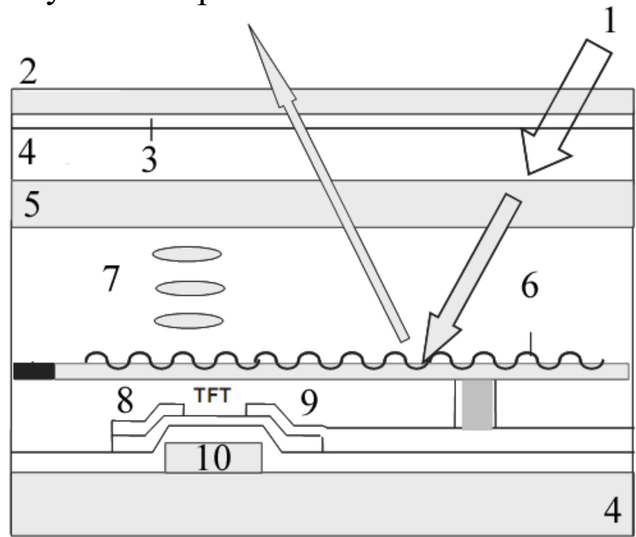


Рис.44. Принципиальная схема ОЖКД прямого видения: 1 – внешний свет; 2 – поляризатор; 3 – пластинка λ/4; 4 – стекло; 5 –цветной фильтр; 6 – ребристый рефлектор; 7 – слой ЖК; 8 – исток; 9 – сток; 10 – затвор [109].

ЖК ячейки с планарной ориентацией не пригодны для просветных дисплеев, поскольку имеют малый угол обзора и недостаточное качество темного фона при отображении цветов. Однако в отражательных дисплеях угол наблюдения эквивалентен двухдоменной ячейке благодаря отражению от зеркала. Для дисплеев с малым экраном требование к широкому углу обзора не являются определяющим, поэтому планарные ячейки могут быть использованы. Для обеспечения темного фона в полноцветной планарной ячейке используется фазовая компенсационная пленка, устраняющая остаточную фазовую задержку, вызванную граничными слоями. Для ячейки для такого дисплея должно выполняться условие: минимальное значение величины $d\Delta n = \lambda/4$. Для λ=550нм величина $d\Delta n$ = 137,5нм. В зависимости от назначения устройства можно выбирать или малую толщины для обеспечения быстрого отклика, или малую величину двулучепреломления, определяющую удобную для изготовления толщину ячейки.

Для отражательных дисплеев прямого видения и проекционных используется твистовый нематик (MTN) с углом закрутки от 45° до 90°. В полупрозрачных дисплеях обычно используют MTN ячейки с углом закрутки 75° и 90°. На рис.45 приведены расчетные зависимости коэффициента отражения от напряжения для этих MTN ячеек.

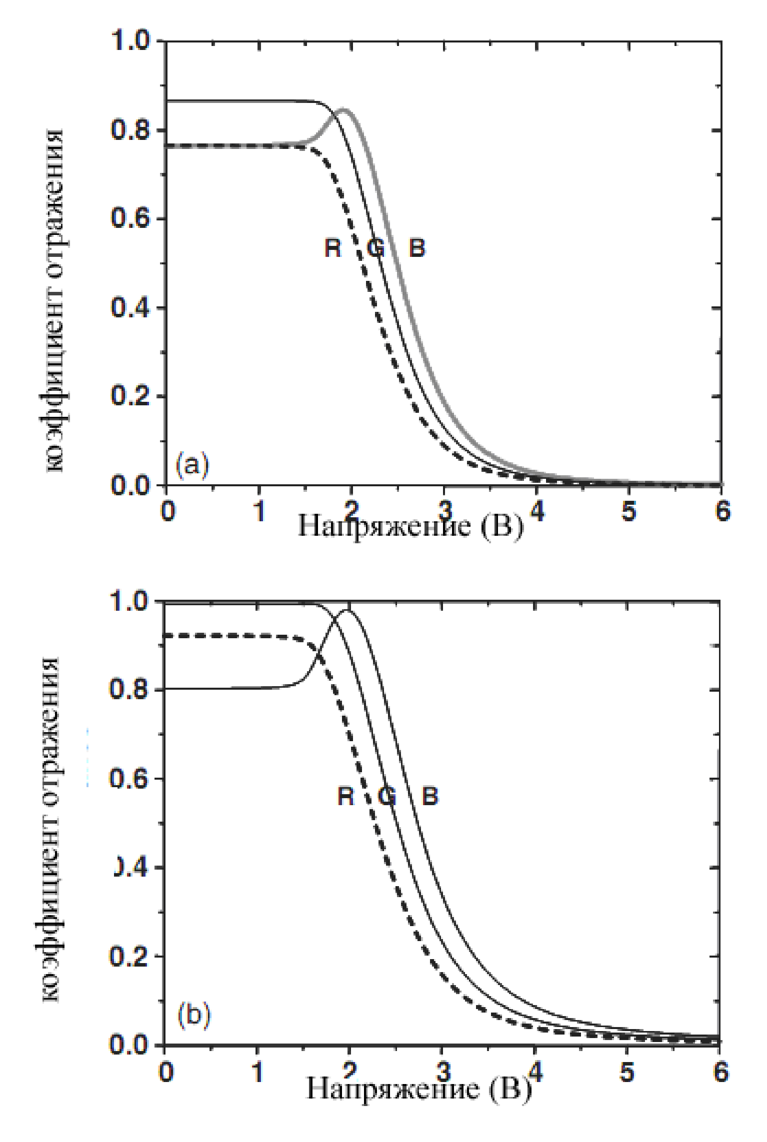


Рис.45. Зависимость коэффициента отражения от напряжения для MTN ячейки с углами закрутки 90° (a) и 75° (b).

Моделирование проводилось для смеси Мерк MLC-6694-000 (Δn =0,0857 при λ=540 нм), угол наклона 2°. 90° MTN ячейка имела $d\Delta n$ = 240 нм и угол β между направлением поляризации и директором ЖК равный 20°; 75° MTN ячейка - $d\Delta n$ = 250 нм и угол β = 20°. Для обеих ячеек наблюдается слабая зависимость кривых от длины волны. При расчете выбирались следующие диапазоны длин волн: R=620-680 нм, G=520-560 нм и B=420-480 нм. Как видно из рис.8.26а, 90° MTN ячейка имеет хорошее качество черного состояния, однако максимальное отражение составляет только 88%. 75° MTN ячейка имеет отражение около 100%, но темное состояние хуже. Контрастное отношение при 5 В составляет величину 100:1.

Обзор жидкокристаллических материалов, разработанных для дисплеев прямого видения с активно-матричным управлением, приведен в работе [110].

4.3. Проекция изображений на большой экран

Для проекции изображений на большой экран применяются различные устройства на основе ЖК: оптически управляемые пространственно-временные модуляторы света (ПВМС), ЖКД на кремнии (LCOS) и лазерные системы с ПВМС и внутренним сканированием.

Проекция изображений с использованием оптически управляемых пространственно-временных модуляторов света

Для проекции изображений на большой экран использовались различные электрооптические эффекты в ЖК: твист-эффект в НЖК, управляемое светорассеяние в ЖК, диспергированных в полимерной матрице (PDLC), и др. На рис.46 приведена оптическая схема с использованием ПВМС на нематике для создания проекции [111].

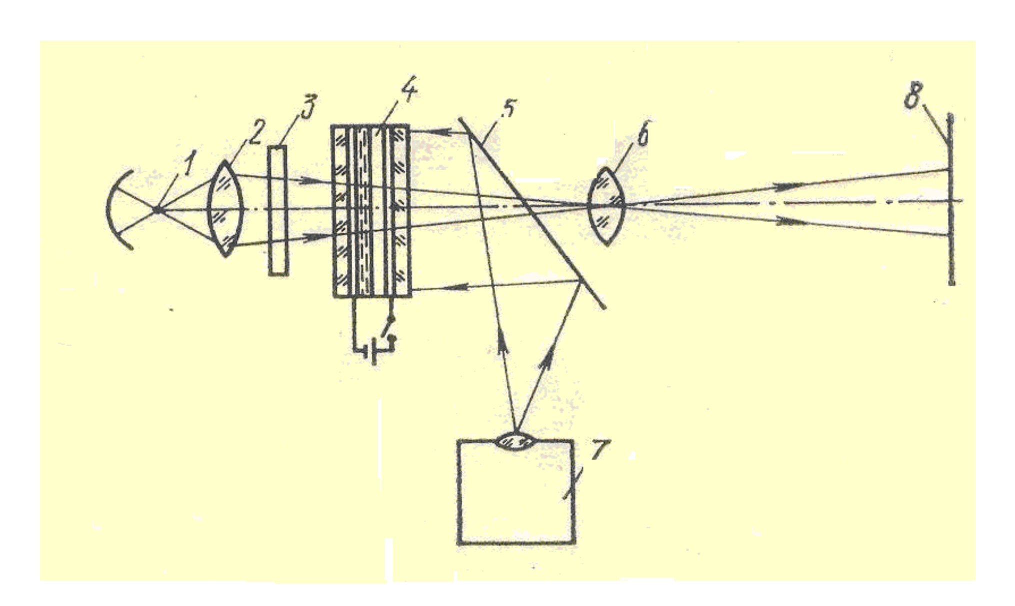


Рис.46. Схема проекции изображения на ПВМС на большой экран: 1 – источник света; 2 – линза; 3 – светофильтр; 4 – ПВМС на НЖК; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – объектив; 7 – сигнальная ЭЛТ; 8 – экран. на фотополупроводниковый слой с помощью объектива (6) и зеркала (5). Одновременно проекционная лампа (1) осуществляет проецирование возникшего на слое ЖК изображен

Изображение небольшого размера, получаемое на экране ЭЛТ (7), проецируется ия с усилением яркости на экран (8). Для поглощения той части спектра излучения, к которой фотопроводник наиболее чувствителен, перед проекционной лампой установлен светофильтр (3). Достоинством таких устройств является возможность получения движущихся изображений с высоким пространственным разрешением. Их основным недостатком является низкая световая эффективность вследствие использования поляризаторов. Этот недостаток может быть устранен использова-

нием ПВМС на основе нематика, диспергированного в полимерную матрицу (PDLC) [112, 113] (рис.47).

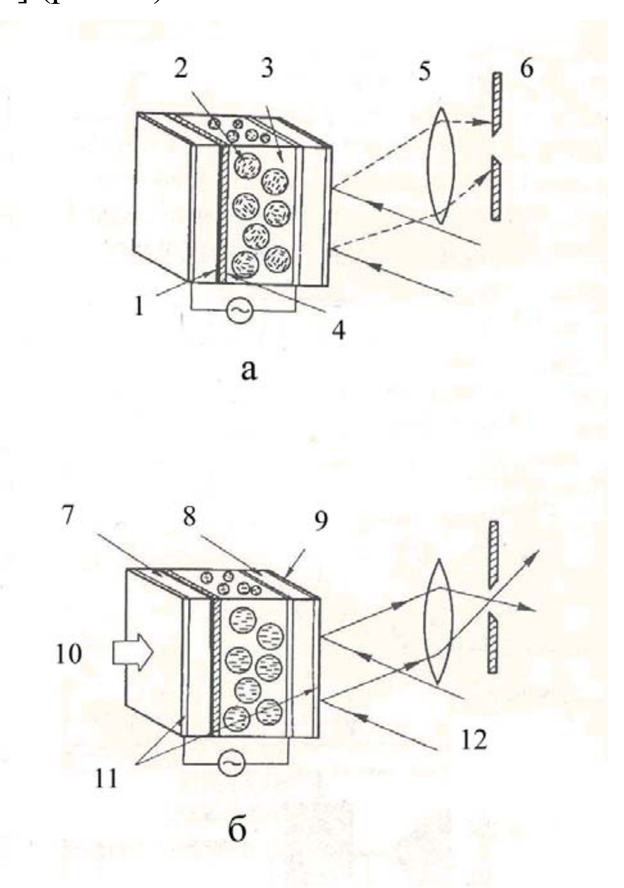


Рис.47. Схема ПВМС на PDLC: а – в отсутствие записывающего излучения; б – при наличии записывающего излучения [38]. 1 – светопоглощающий слой; 2 – НЖК; 3 – полимер; 4 – диэлектрическое зеркало; 5 – линза; 6 – диафрагма; 7 – фотопроводник; 8 – стекло; 9 – просветляющий слой; 10 – записывающее излучение; 11 – прозрачные электроды; 12 – считывающее излучение.

В этом случае используется эффект управляемого светорассеяния, не требующий использования поляризаторов, что повышает световую эффективность более чем в 2 раза. В отсутствии записывающего излучения 10 диафрагма 6 перекрывает свет, проецируемый на экран. При наличии записывающего излучения изображение с помощью считывающего излучения 12 передается на экран. Устройство обеспечивает разрешение порядка 50 лин/мм, контрастное отношение 230:1 и температурный диапазон эксплуатации от 10 до 80°C.

Отражательные ЖКД на кремнии (LCOS), называемые также микродисплеями, дают высококонтрастное изображение, иногда создаваемое на большом экране. В общем случае LCOS используются для создания мнимых изображений в компактных электронных устройствах отображения информации индивидуального пользования и в качестве проекционных

дисплеев, в частности, для создания ТВ систем с обратной проекцией. Хотя пространственное разрешение и оптические системы таких устройств различны, используемые в дисплее ЖК на кремнии физические эффекты одинаковы.

В качестве примера на рис.48 показана схема дисплея LCOS, разработанного компанией JVC.

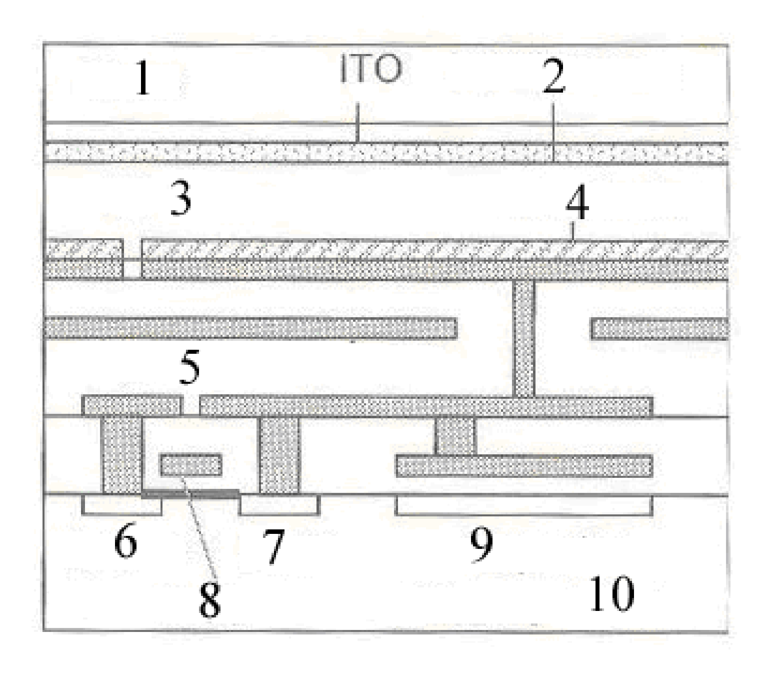


Рис.48. Схема дисплея LCOS: 1 – стекло; 2 – ориентирующий слой; 3 – слой ЖК; 4 - алюминиевый рефлектор; 5 – светоблокирующий слой; 6 – исток; 7 – сток; 8 – затвор; 9 – емкость; 10 – кремниевая подложка [114].

КМОП (CMOS) транзистор и конденсатор формируются и соединяются на нижней кремниевой подложке. КМОП транзистор может обеспечивать работу с большим объемом данных благодаря высокой подвижности электронов в монокристалле кремния. Электронная подвижность c-Si на два порядка выше, чем в аморфном кремнии α-Si. Отражающий алюминиевый электрод соединен со стоком транзистора и конденсатором с помощью легкого металлического блокирующего слоя. После чистовой обработки алюминиевое пикселированное зеркало приобретает коэффициент отражения около 91%. Размеры электрода 13×13 мкм, расстояние между электродами 0,5 мкм, апертура равна 93%. Экран с разрешением 1365×1024 имеет соотношение 4:3 и размер по диагонали 23 мм. Для защиты транзистора от паразитного света, уменьшающего пространственное разрешение и качество изображения, введен светоблокирующий слой. При использовании световой блокировки и термическом охлаждении такое устройство обеспечивает 15000 лм, требуемых для электронного кино при использовании ксеноновой лампы мощностью 5 кВ. Рассмотрим основные характеристики этих дисплеев.

Микродисплеи на кремнии имеют большую плотность пикселей, чем дисплеи прямого видения, имеющих плотность 100 лин./дюйм. Для просветных TFT ЖКД на поликремнии размеры пикселей уменьшаются до 20-40 мкм из-за повышения подвижности электронов. Отражательные микродисплеи на КМОП технологии имеют пикселы размером 6-12 мкм, что обеспечивает их плотность более 1000 лин./дюйм. Получаемое изображение по разрешению сравнимо с разрешением киноизображения.

Контрастное отношение для ЖК дисплеев существенно зависит от ориентации молекул. TN ЖКД имеет контрастное отношение 300:1, а гомеотропная ячейка – более чем 1000:1.

Время отклика дисплеев прямого видения составляет величину порядка 20-40 мс. В проекционных дисплеях на α-Si при толщине слоя ЖК 3 мкм характерное время формирования кадра (включение-выключение) составляет менее 16 мс.

Оптические схемы формирования изображений при использовании ЖК дисплеев на кремнии

Создаваемое микродисплеями изображение мало и для их увеличения разработаны оптические схемы. Схема для получения мнимого изображения в переносных устройствах индивидуального пользования (виртуальный дисплей) приведена на рис.49. Наблюдатель, глядя в небольшой визир, видит увеличенное изображение в плоскости на некотором расстоянии от себя. Светодиоды, излучающие свет трех основных цветов, используются для получения полноцветного изображения. Если дисплей имеет экран с диагональю 12,7 мм и разрешением 800×600 пикселей, то для получения изображения, эквивалентного изображению на экране с диагональю 19”, расположенного на расстоянии 2 м, требуемое увеличение должно быть порядка 15×. Для обеспечения частоты смены кадров 85 Гц время включения-выключения должно быть меньше 3,9 мс, что обеспечивается уменьшением толщины слоя ЖК до 1 мкм.

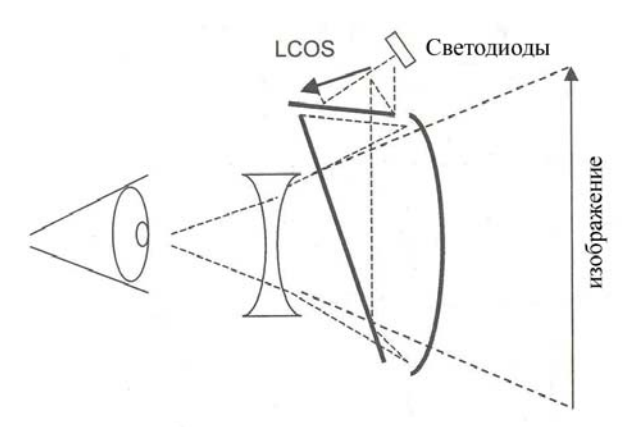


Рис.49. Оптическая схема для получения увеличенного изображения микродисплея на кремнии [114].

Для проецирования изображения, создаваемого микродисплеями на кремнии, на экран используются более сложные оптические системы. Они должны обеспечивать однородность освещенности по диагонали экрана более 85%. На рис.50 показан пример профессионального проектора на большой экран, использующий 3 отражательных дисплеев на кремнии.

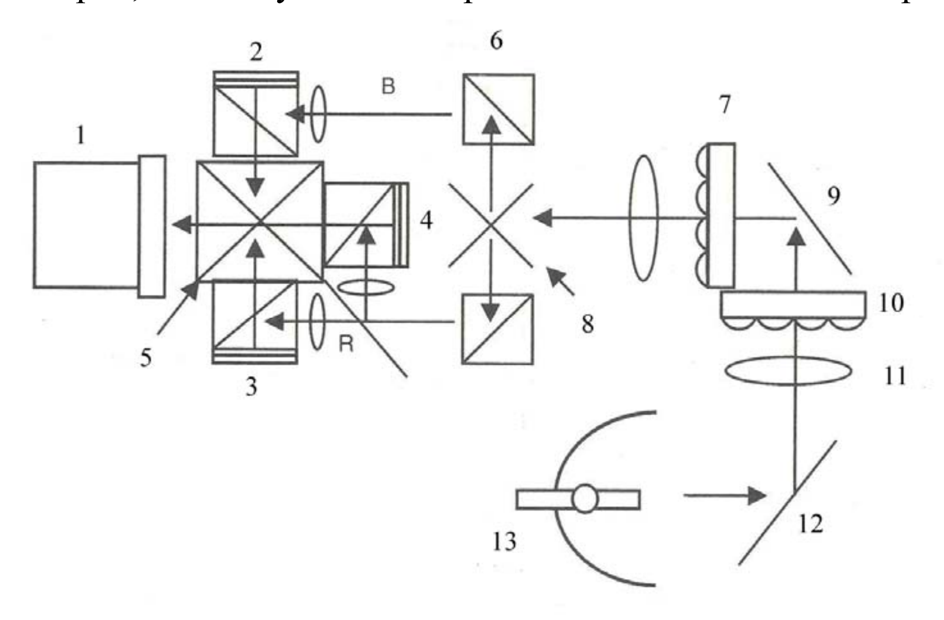


Рис.50. Проекционный дисплей, использующий 3 микродисплея на кремнии: 1 –проекционный объектив; 2 – синий ЖКД; 3 – красный ЖКД; 4 – зеленый ЖКД; 5 – куб-смеситель; 6 – поляризатор; 7 – комбинированный поляризатор; 8 - цветоделитель; 9 – зеркало; 10 – интегратор; 11 – конденсор; 12 – охлаждаемое зеркало; 13 - лампа [114].

Охлаждаемое зеркало используется для устранения нежелательного ИК излучения и отражения света только в видимом диапазоне. Цветной разделитель лучей направляет свет трех длин волн соответствующим микродисплеям. X –куб преобразовывает и модулирует RGB лучи, создавая изображение на экране с помощью проекционной оптики.

Для упрощения схемы фирмами Philips и OCLI были разработаны две проекционные призмы (рис.51).

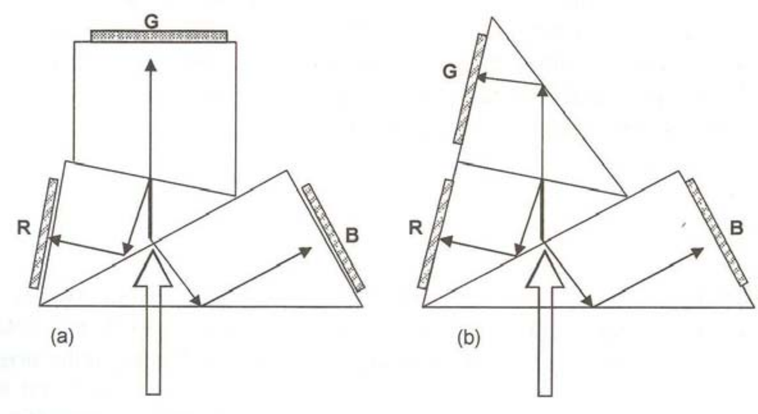


Рис.51. Две призмы для трех ОЖКД: призма фирмы Philips (a) и OCLI (b).

Устройство фирмы OCLI отличается от разработки фирмы Philips введением двух остроугольных призм. Преимуществом этого устройства является меньший вес и сокращение расходов на изготовление.

ЖКД, используемые в проекционных системах всех типов, должны иметь повышенную стойкость к большим световым потокам и температуре. Обзор по микродисплеям приведен в работе [115].

Лазерные проекционные жидкокристаллические дисплеи

За последние годы были существенно улучшены параметры проекционных дисплеев, которые можно рассматривать как альтернативу квантоскопа. Один из вариантов проекционного дисплея, использующего пространственно-временную модуляцию света с помощью ЖК, описан в работах [116-118]. Этот проекционный дисплей имеет высокую оптическую эффективность, обеспечиваемую применением лазера с сопряженным резонатором. Одно из лазерных зеркал выполнено в виде пространственно-временного модулятора света (ПВМС) на ЖК. Основная идея состоит в объединении работы лазера и ПВМС в схеме, позволяющей генерировать яркий оптический сигнал непосредственно в виде изображений, создаваемых на ПВМС (рис.52).

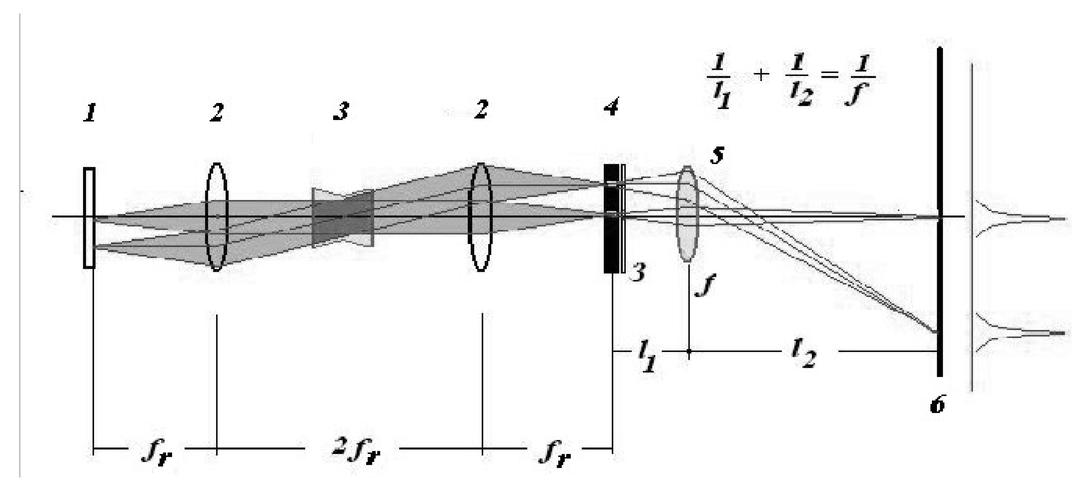


Рис.52. Оптическая схема проекционного лазерного дисплея с ПВМС на ЖК: 1 - зеркало резонатора; 2 – линзы; 3 – активная лазерная среда; 4 – зеркало в виде ПВМС; 5 – проекционная линза; 6 – экран.

Лазер содержит сопряженный резонатор с зеркалами 1 и 4 и активную среду 3. ПВМС расположен внутри лазерного резонатора как одно из зеркал, например, зеркало 4. Проекционная линза 5 переносит изображение, создаваемое на ПВМС, на экран 6. Резонатор работает как оптический ретранслятор, и плоскости зеркал отображаются друг в друга. Это означает, что ПВМС осуществляет селекцию мод, что вызывает генерацию либо на одной моде (режим сканирования или адресации), либо на суперпозиции множества мод (режим генерации изображений). Достоинством систе-

мы, имеющей несколько модификаций, является высокая оптическая эффективность, поскольку она осуществляет генерацию только необходимого изображения. Эффективность подтверждена результатами экспериментального исследования макета. Устройство не требует охлаждения. При плотности мощности записывающего Nd:YAG лазера с накачкой от лазера на красителе R6G на длине волны 0,4-0,5 мкм 10^4 Вт/см^2 плотность мощности считывающего излучения при длительности импульса 20 нс составила 8×10^5 Вт/см^2. ПВМС содержал структуру: фотопроводник AsSe и ХЖК. Оптическое разрешение в изображении составило более 25 лин/мм.

Одной из областей применения проекционных дисплеев являются тренажеры для обучения управлением транспортными средствами [118]. Тренажеры предоставляют оператору визуальную информацию при широком угле обзора в пределе полной сферы. Решение этой задачи может быть осуществлено только за счет использования нескольких оптико-проекционных систем высокого качества. Как следствие этого возникает необходимость решения нескольких проблем: получение неискаженного изображения при его проекции на неплоский экран; получение слитного (бесшовного) изображения при его формировании несколькими проекционными системами, а также сохранение правильной цветопередачи в изображении. При этом каждое решение зависит от конкретной задачи, в которой необходимо учитывать угловые характеристики поля зрения, число опера торов, которым представляется визуальная информация, а также характеристики создаваемых изображений: пространственное разрешение, контраст, количество световых градаций или градаций шкалы серого. Возможность удовлетворения этих требований определяется существующей элементной базы и специальными устройствами, устраняющими дисторсию проецируемых изображений и обеспечивающими их бесшовную сшивку. В зависимости от угла обзора и требования максимальной реалистичности существует два пути решения задачи: использование оптико-проекционных систем для отображения двумерных и трехмерных изображений.

Принципиальная схема коллимационной оптико-проекционной системы двумерных изображений показана на рис.53. Она содержит экран задней проекции 1, коллимационное (неплоское) зеркало 2, место расположения оператора 3, поляризационный расщепитель пучка 4, поляризатор 5. Проекционный ЖКД 6 может работать с зеркалом 2 на просвет или на отражение. Для обеспечения широкого угла обзора используют несколько проекционных устройств. Несмотря на сложности в решении этих задач, они оказались преодолены, а описанная схема с модификациями явилась основной для создания тренажеров.

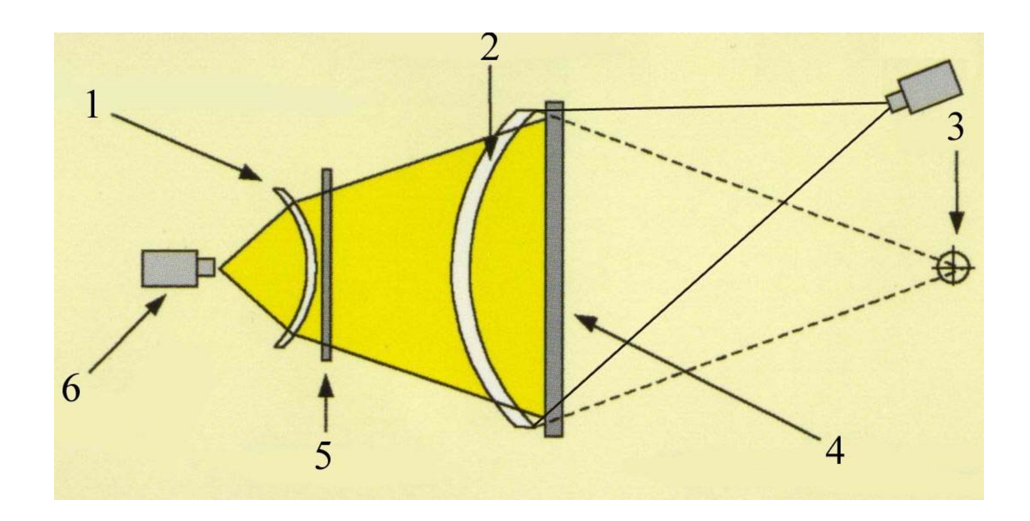


Рис.53. Коллимационная схема проекционной системы для отображения двумерных изображений: 1 – экран задней проекции, 2 - коллимационное (неплоское) зеркало, 3 - место расположения оператора, 4 - поляризационный расщепитель пучка, 5 – поляризатор, 6 – проекционный ЖКД [118].

На рис.54 показан внешний вид широкоугольного многоканального коллимированного тренажера «Панорама» разработки фирмы SEOS с радиусом зеркала 3,3 м; 220º х 60° [118].



Рис.54. Внешний вид тренажера «Панорама» [118].

К основным типам тренажеров, разрабатываемых компанией SEOS, относятся системы «Продас» (Prodas), «Панорама» (Panorama), «Мидас» (Midas) и «Лусид» (Lusid), отличающиеся размером экрана, углом поля зрения и количеством проекционных каналов [118]. Подробный анализ основ проекционных дисплеев приведен в работах [119, 120].

4.4. ЖКД на эластичной подложке

К новому поколению телевизионных дисплеев с большим размером экрана предъявляется требование существенного уменьшения веса. Также имеется много применений ЖКД, где отображение информации не всегда удобно осуществлять на плоском экране. Это способствует развитию легких дисплеев на эластичной подложке [121, 122]. На рис.55 показан переход от традиционной схемы дисплея к ЖКД на эластичной подложке.

Первый матричный дисплей на полимерной подложке, использующий бистабильный эффект в ЖК, был разработан фирмой Philips. Для создания эластичных дисплеев необходимо было решить ряд проблем, связанных со структурой дисплеев и материалами.

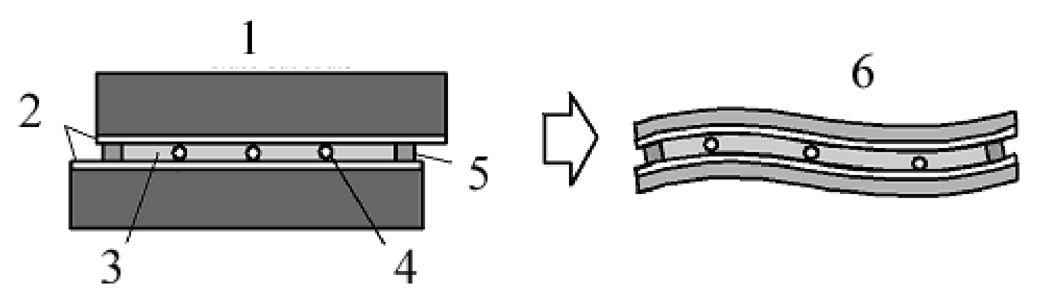


Рис.55. Переход к дисплеям на эластичной подложке: 1 – стеклянная подложка; 2 – прозрачные электроды; 3 – слой ЖК; 4 – спейсер; 5 – герметик; 6 – полимерная подложка [121].

В частности, для обеспечения однородности толщины слоя ЖК и его ориентации были использованы специальные спейсеры (полимерные стенки) и полимерные волоконные элементы (рис.56).

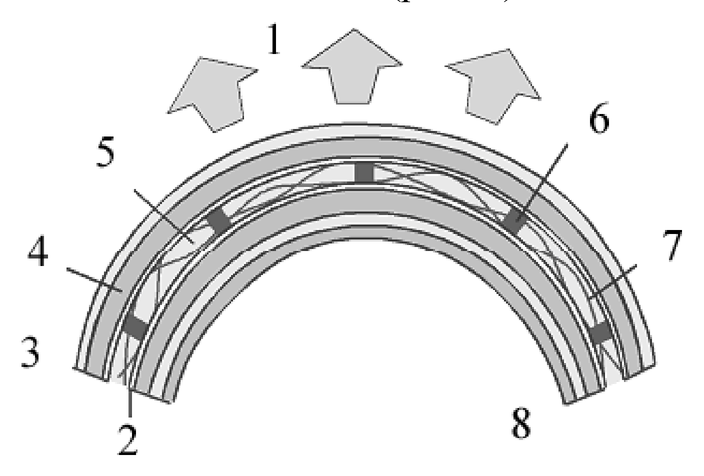


Рис.56. Сечение дисплея на эластичной подложке с использованием С*ЖК: 1 свет; 2 – прозрачный электрод; 3 – поляризационная пленка; 4 – полимерная подложка; 5 – слой С*ЖК; 6 – полимерная стенка; 7 – полимерное волокно; 8 – гибкий источник задней подсветки [121].

Для отображения быстродвижущихся объектов использовался С*ЖК, диспергированный в полимерную пленку. Этот композит помещался между скрещенными поляризаторами и ламинировался вместе с эластичной пленкой задней подсветки.

Пример эластичного полноцветного дисплея показан на рис.57. Помимо С*ЖК были использованы твистовые нематики с красителем и ХЖК. Технология изготовления эластичных дисплеев описана в работе [121]. Она позволяет получать дисплеи с высокой яркостью и контрастом изображения, широким углом обзора и низкой потребляемой энергией.

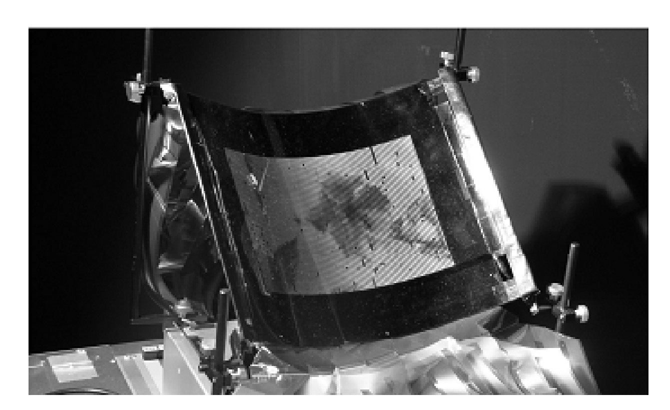



Рис.57. Пример полноцветного дисплея на С*ЖК размера А4 (96 x 64 пикселей) с эластичным слоем задней подсветки [122].

В работе [122] описан эластичный дисплей на основе бистабильного отражательного эффекта в ХЖК. Рассмотрены его применения в качестве записной книжки, осуществляющей запись рукописного текста под действием давления, телефонов с изменяемым цветом экрана и эластичной смарт-картой.

Ведутся работы по созданию миниатюрных дисплеев на гибкой подложке на эффектах твист, гость-хозяин и в структурах PDLC. Для их изготовления разрабатывается принципиально новая технология капельного заполнения ЖК в гибкую подложку, резко уменьшающая стоимость микродисплеев при сохранении высоких эксплуатационных параметров.

5. ДИСПЛЕИ ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ 3-Х МЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Окружающий нас мир – трехмерный, и тенденции создания сверх реалистических дисплеев делает актуальным создание объемных дисплеев. Для многих применений, например, для решения задач распознавания образов, наведения летательных объектов на цель, выполнения хирургических операций, моделирования архитектурных сооружений, задач обучения, в телевидении, кино, развлечениях и др. предпринимаются попытки создания дисплеев для отображения объемных объектов [123, 124]. Для

развития этого направления в 2002 г. был создан международный консорциум, в котором к 2005 г. состояло более 150 компаний. Задачами консорциума является создание научной и производственной базы, а также развитие рынка услуг в этой области.

У человека стереоскопическое зрение обеспечивается наличием двух глаз, информация от которых обрабатывается сначала раздельно и параллельно, а затем синтезируется в зрительный образ. Сетчатка глаза формирует двумерное изображение, а информация о глубине пространства создается в мозгу. В основе объемного восприятия лежит различие изображений, получаемых каждым глазом, что создает ощущение глубины или стереоэффект. Человек оценивает расстояние до объекта и его габариты по расстоянию между проекциями его изображения на сетчатках правого и левого глаза. Выделить изучаемый объект из разнородного окружения позволяет фокусирование по глубине - аккомодация, изменение формы хрусталика глаза. Операция сравнения расположения проекций возможна лишь до тех пор, пока дистанция между ними находится в определенных пределах. Расширить диапазон различаемых расстояний удается с помощью функции конвергенции, поворачивающей глазные яблоки на необходимый угол. Аккомодация и конвергенция напрямую связаны между собой, что становится причиной появления чувства дискомфорта, напряжения и неестественности у пользователей большинства современных трехмерных дисплеев. Чтобы воссоздать реальную глубину и объем, придется изготовить устройство, сопоставимое по размерам с отображаемыми объектами, что, конечно же, нереально. Устранение указанного рассогласования является одной из основных задач стереодисплеев. Поэтому разработчики ищут способ имитировать необходимые для комфортного просмотра характеристики изображения. Отметим, что указанная проблема отсутствует в объемных (volumetric) дисплеях.

Механизм зрения использует ряд факторов для обеспечения ощущения глубины изображения. Существует несколько монокулярных факторов, создающих ощущение глубины двумерных изображений: тени, преграды, относительные размеры, ухудшение резкости, аккомодация, перспективная дисторсия, параллакс движения (удаленные объекты кажутся движущимися с меньшей скоростью). Бинокулярными факторами глубины пространства являются конвергенция, характеризующая угловую сходимость, и горизонтальная диспарантность (рис.58а, б).

Противоречие между аккомодацией и конвергенцией уменьшается с увеличением бинокулярной глубины. В реальных сценах фокусировка глаз на объект и дивергенция зависят от расстояния до объекта. Комбинация монокулярных и бинокулярных факторов создают трехмерный эффект. При наблюдении объемных изображений в 3D дисплеях за счет их несовершенства появляются некоторые дефекты, уменьшающие эффект глубины: раздвоение, сокращение кадра, кулисный эффект [125].

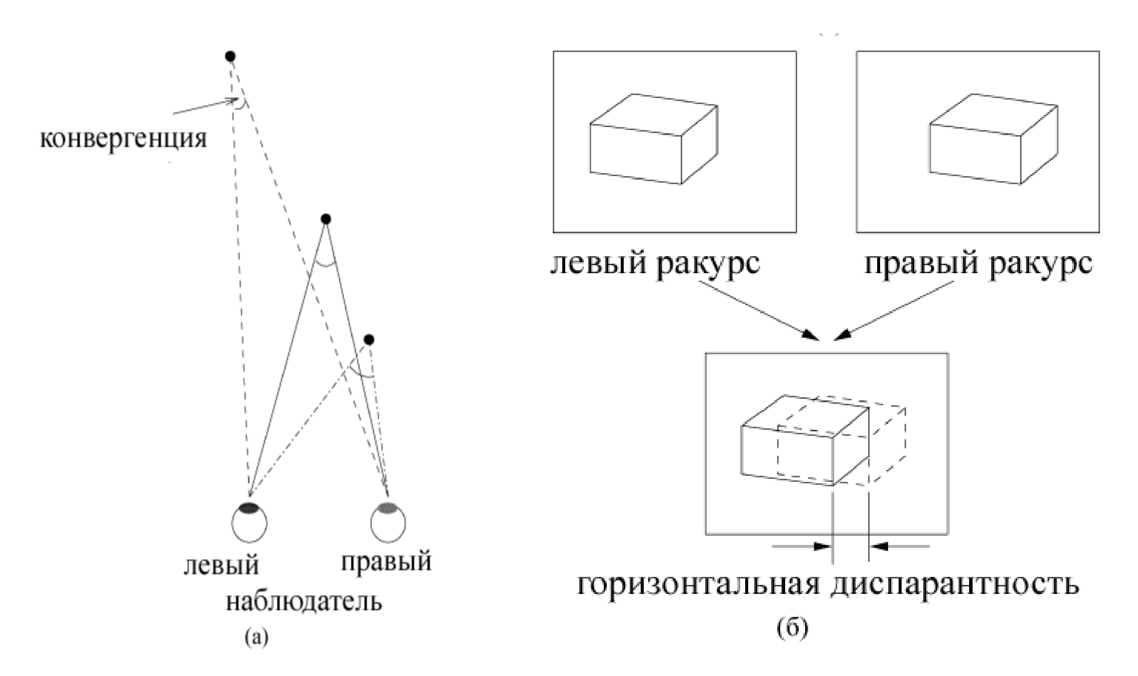


Рис.58. Конвергенция (а) и горизонтальная диспарантность (б) [125].

Большинство технологий объемных дисплеев позволяют отображать как ближнюю, так и дальнюю части пространства. На рис.59 показан сдвиг между левым и правым пикселем для случая, когда объемный объект находится впереди или позади экрана. Для объекта в плоскости экрана левый и правый пикселы совпадают.

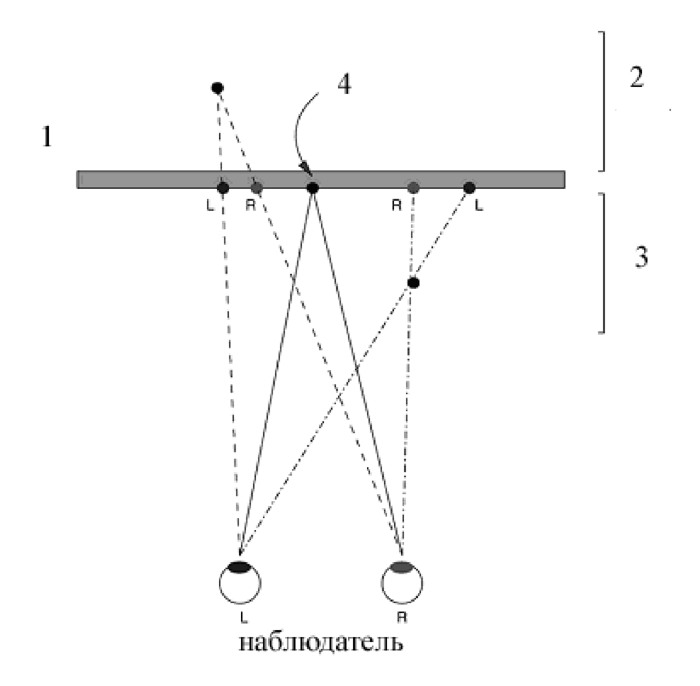


Рис.59. Ближняя и дальняя части пространства, отображаемые объемным дисплеем: 1 – дисплей; 2 – задняя глубина; 3 – передняя глубина; 4 –точка в плоскости дисплея [125].

Технологии создания объемных дисплеев базируются на учете особенностей восприятия трехмерных сцен и объектов человеком. Широкое

разнообразие объемных дисплеев принято классифицировать на три главных типа: объемные (volumetric), голографические, стереоскопические и автостреоскопические [126].

5.1. Объемные дисплеи – дисплеи реального трехмерного изображения

Объемными (volumetric) называют особый класс дисплеев, формирующих объемные изображения на быстро вращающемся неплоском экране [127-129]. Такие изображения можно наблюдать, обходя их с разных сторон. Хотя размер такого экрана мал, он обеспечивает высокое разрешение в вокселях.

Одна из первых разработок была выполнена отечественными учеными (рис.60) [130, 131]. Авторами предложена система визуализации трехмерных изображений и методы увеличения отображаемых элементов в объемном кадре на основе векторного управления положением лазерного луча и синтеза широкополосного сигнала возбуждения акустооптического дефлектора.

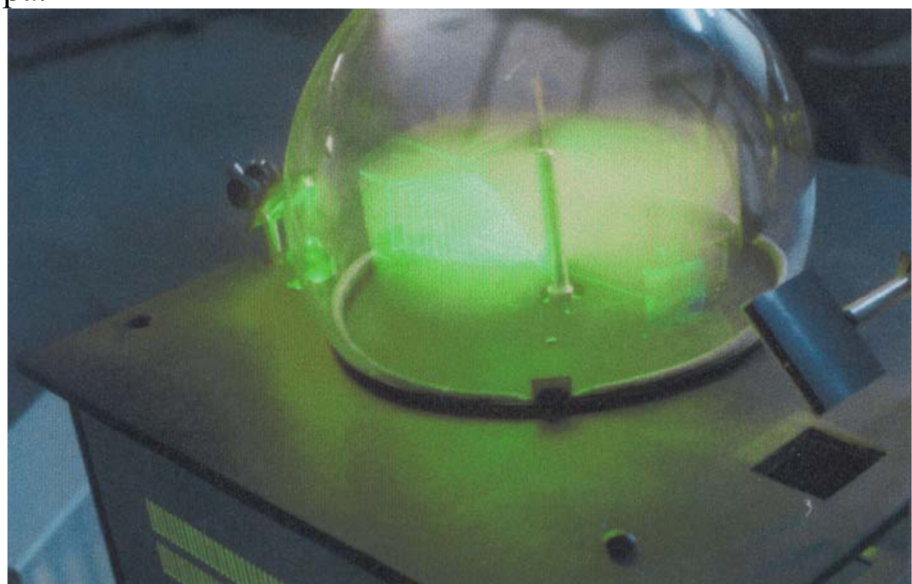


Рис.60. Внешний вид объемного дисплея [131].

Объемное изображение формировалось по точкам при взаимодействии лазерного луча, идущего снизу, с вращающимся прозрачным экраном, выполненном в виде винта. Размер формируемого изображения ограничивался диаметром винта и составлял величину 100x100x100 мм^3. Частота кадров составляла 25 Гц, число разрешаемых вокселей – 250000, объем памяти – 3,5 Мб. Можно использовать как аргоновый, так и гелий-неоновый лазер.

Более совершенный дисплей, являющийся развитием отечественного объемного дисплея, был разработан компанией Actuality System (США) [132-134]. Его схема и внешний вид приведены на рис.61. Размер форми-

руемого изображения ограничивался диаметром винта 25 см. Отображаемая информация представлялась в 198 сегментах, разрешение каждого сегмента составляло 768 х 768. Формирование объемного изображения осуществлялось с помощью процессора с использованием пространственно временного модулятора, работающего с частотой 5000 кадров/с. Частота кадров составляла 30 Гц, число цветных пикселов в одном кадре достигало 40 тыс., пропускная способность – 1,3 Гб/с. Эти дисплеи представляют интерес для диспетчерской службы аэропортов, хирургии, архитектуры, компьютерной графики и обучения. Подобные системы можно использовать и для других целей, в частности для управления движением транспортных средств в космосе [135-137].

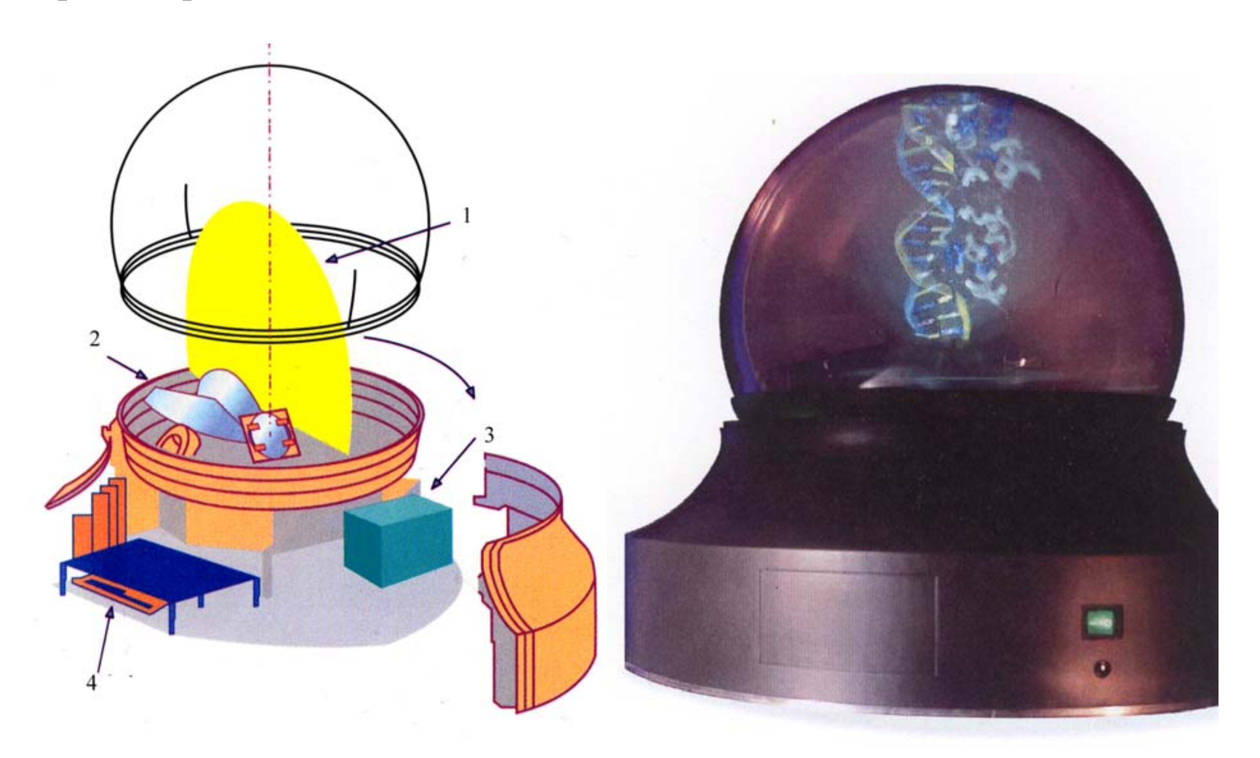


Рис.61 Схема и внешний вид объемного дисплея, разработанного компанией Actuality System (США): 1 – проекционный экран; 2 – оптическая система; 3 – проектор; 4 – система развертка и блок памяти [132].

Еще один прототип полноцветного дисплея (volumetric) с разрешением 96 × 128 пикселей был разработан на фирме Sony. Он также позволяет рассматривать трёхмерное изображение, создаваемое с помощью светодиодов, с любого угла и одновременно из нескольких точек.

Альтернативным описанным выше устройствам является дисплей, схема которого приведена на рис.62 [138, 139]. Это многослойная, «кулисная» система экранов.

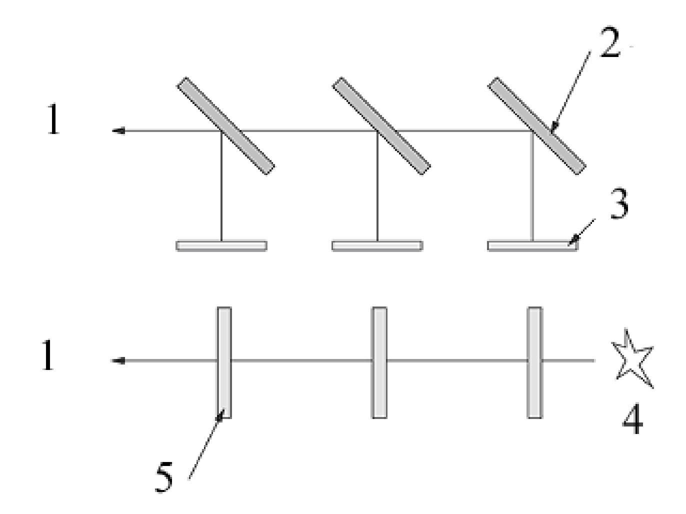


Рис.62. Два типа объемных дисплеев с различным расположением экранов. Вверху - использование ЖК экранов, работающих с полупрозрачными зеркалами. Внизу – ЖК экраны, работающие на просвет. 1 – наблюдатель; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – ЖКД: 4 – задняя подсветка; 5 – ЖКД без задней подсветки [138].

Чтобы сформировать полный трехмерный объект, необходимо вводить соответствующие световые сигналы в каждую адресуемую, т.е. рассеивающую свет плоскость экрана, в то время как другие (не адресуемые) плоскости в этот момент являются прозрачными (рис.63).

В работе [139] изучены режимы светорассеяния в монодоменных слоях С*ЖК, используемых в электрооптических модуляторах, предназначенных для многослойного объемного экрана трехмерного дисплея. Для различных составов С*ЖК-композиций, граничных условий и режимов импульсного управления С*ЖК-модулятором обнаружено несколько типов рассеяния света. При переходном типе светорассеяния минимальный период его включения-выключения биполярными импульсами амплитудой 50 В составляет около 130 мкс, при рассеянии на сегнетоэлектрических доменах объемно-стабилизированного слоя негеликоидального СЖК это время приближается к 400 мкс, а при рассеянии на геликоидальной структуре С*ЖК оно не превышает 600 мкс. Результаты свидетельствуют о возможности создания на основе С*ЖК-модуляторов объемных экранов глубиной в 30-100 сечений.

Обычно рассеяние включается и выключается поочередно, т.е. вначале включается и выключается в первой, затем во второй, затем в третьей плоскости - и так до последней плоскости, после чего возобновляется снова в первой плоскости, второй и так далее. Для наблюдения непрерывного, без мерцаний трехмерного изображения объекта частота воспроизведения его сечений и вместе с ними объекта в целом должна быть не менее 25 Гц, т.е. это изображение должно быть визуализировано за 40 мс и менее. Чем больше число сечений, тем короче время визуализации каждого из них, или тем быстрее должно включаться и выключаться рассеяние света в

плоскостях сечений объекта. Включение экранов, расположенных на различном расстоянии от наблюдателя, создает ощущение объемного изображения. Число экранов определяет разрешение по глубине.

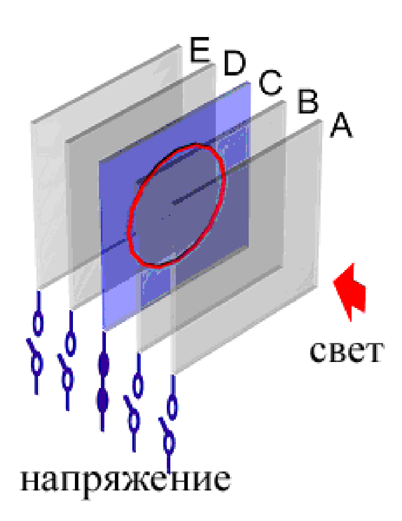


Рис.63. Схема объемного экрана на основе ряда электрически управляемых светорассеивающих ЖК модуляторов [139].

В работе [140] описана модификация объемного дисплея с использованием ЖК адаптивной линзы с использования мультипланарного оптического элемента является Depthcube разработки двухчастотным управлением, формирующего объемное изображение без мелькания в угле обзора от -10° до +10°.

Примером фирмы Texas Instruments [141]. Он проецирует со скоростью 1500 кадров/с последовательные полноцветные 3D срезы изображения в объем мультипланарного оптического элемента, где каждый срез фиксируется на соответствующей глубине. В результате послойной развертки образуется гладкий, непрерывный в пространстве ортогональный трехмерный массив вокселов. Каждому вокселу соответствует 15-разрядный код яркости и цвета.

Мультислойный оптический элемент представляет собой стопку из 20 разделённых воздушным зазором ЖК затворов. В качестве ЖК материала в затворах применяется стабилизированный холестерический полимер. Затвор имеет коэффициент пропускания в открытом (прозрачном) состоянии около 88% и 2% коэффициент пропускания в рассеивающем состоянии (рабочий угол 10°). Скорость переключения ЖК из прозрачного состояния в рассеивающее 0,39 мс, а из рассеивающего состояния в прозрачное – 0,08 мс. Благодаря своей мультислойной структуре 3D-изображение на Depth-Cube-дисплее имеет ту же глубину, что и реальные объекты. Поэтому есть все основания использовать для него определение «дисплей реального 3D-изображения. В отличие от стереоскопических и автостереоскопических дисплеев, Depth-Cube поддерживает нормальное соотношение между фокусным глазным расстоянием и конвергенцией, для

того чтобы обеспечить очень комфортабельное и реалистичное наблюдение 3D-изображений без утомления глаз. Depth-Cube обеспечивает реальный параллакс при смещениях как по вертикали, так и по горизонтали, позволяя наблюдателю видеть объекты на заднем плане, которые при обычном двухмерном представлении скрыты объектами переднего плана.

Кубический дисплей pCubee с ручным управлением ракурса описан в работе [141]. Он содержит пять жидкокристаллических панелей с разрешением 640×480 пикселей (рис.64), размещенных в деревянном корпусе размером 146×120×146 мм. Общий вес составляет 1,3 кг.

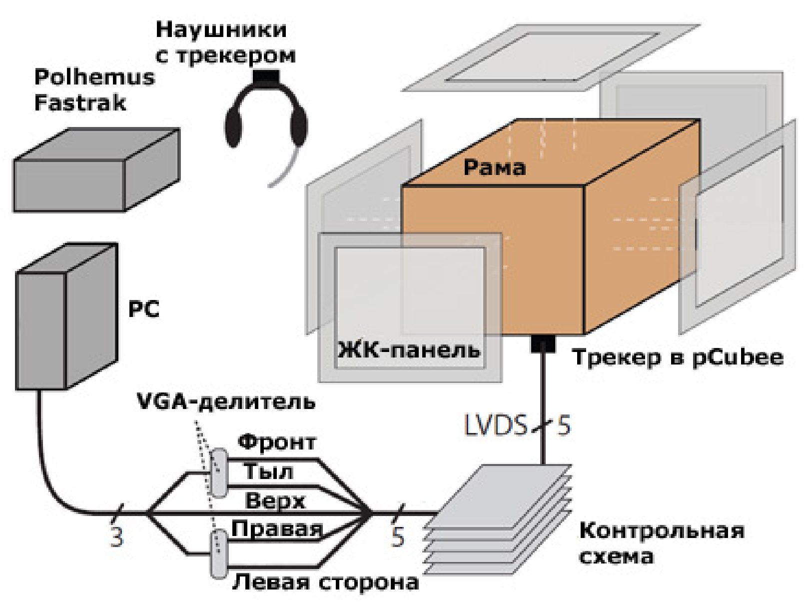


Рис.64. Схема pCubee дисплея [142].

В любой момент времени наблюдатель видит 3 стороны куба. Компьютер создает 3 управляющих VGA сигнала, которые передаются верхней и расположенным друг против друга панелям (передней, задней, левой и правой) для получения всех пяти видеосигналов. Разработчики использовали специальное устройство (Polhemus Fastrak) для высокоточного трекинга движений как самого куба, так и головы пользователя в реальном времени и сразу по шести степеням свободы. Разработанная программа определяет, под каким углом в данную секунду человек смотрит на объект, и синхронно с движениями головы строит на всех пяти экранах картинку с корректным ракурсом. Внешний вид кубического дисплея показан на рис.65. Это устройство демонстрирует объекты виртуального мира. Их можно потрясти, передвинуть или повернуть при помощи наклона самого кубика. Можно дотронуться до них виртуальной указкой и, конечно, рассматривать с разных сторон. Так возникает эффект присутствия трёхмерного предмета внутри прозрачной коробки. Если раньше похожие проекты сосредотачивались в основном на показе статичных сцен либо заранее запи-

санных роликов, то этот дисплей используется для мгновенного отображения динамики виртуальных объектов при взаимодействии их с пользователем и между собой. Изображение в кубе меняется с частотой 40-60 Гц в зависимости от сложности моделируемых объектов.



Рис.65. Пяти панельный кубический дисплей, отображающий 3D модель глобуса; также показано контрольное устройство и наушники с сенсором движений головы.

Имеется возможность держать этот куб в одной руке, а второй управлять отображаемыми объектами при помощи виртуальной указки или мышью. Достоинством объемных дисплеев является неограниченное поле зрения без большого объема необходимой для отображения информации. Они могут применяться для управления движением воздушного транспорта и моделирования карты военных действий. Недостатками объемных дисплеев являются большие габариты, относительно высокая стоимость и в случае использования мультислойных оптических элементов - формирование только просветных изображений.

5.2. Стереоскопические дисплеи

Наблюдатель получает изображение с помощью специальных очков для каждого глаза, согласованных с работой дисплея. В анаглифических очках используются цветные фильтры, либо синие и красные, либо зеленые и красные [126]. Каждый ракурс на дисплее окрашен в цвета фильтра. При согласовании работы дисплея и фильтров очков возникает ощущение глубины, несмотря на получение глазом искаженной цветовой информации. В поляризационных очках используются линзы с различными поляризаторами, согласованными с углами поляризации света, идущего от дисплея для соответствующего ракурса. ЖК затвор, используемый в очках, перекрывает свет, получаемый каждым глазом, синхронно с дисплеем (рис.66).

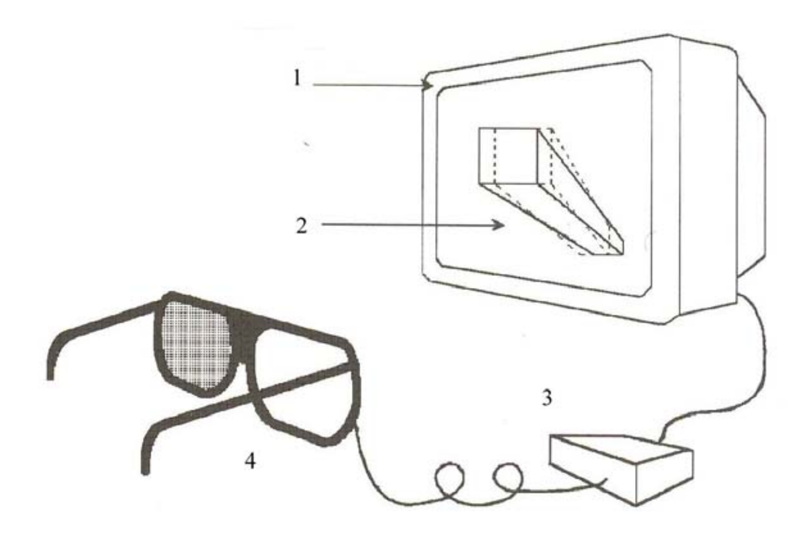


Рис.66. Стереоскопический дисплей с использованием очков с ЖК затвором: 1 – стереомонитор с частотой 120 Гц; 2 – пара стереоизображений; 3 – синхронизатор кадр/затвор; 4 – «активные» ЖК очки.

Для устранения мелькания изображения, времена переключения должны быть достаточно малыми. С 2000 г. ЖК затворы используются в Японии в системе объемного спутникового ТВ на повышенной частоте модуляции, исключающей мелькание изображений. Используемый в этой системе бинокулярный параллакс вызывает нарушение естественного восприятия объемного изображения и приводит к утомлению зрителя. Одной из причин этому является фиксированное положение наблюдателя относительно экрана. По мнению ведущего эксперта США Д. Хоппера размещать вообще что-либо на голове наблюдателя можно только в исключительных случаях, когда это диктуется вопросами жизни или смерти, как, например, в авионике [143,144]. Поэтому основные усилия разработчиков направлены на разработку много параллаксных безочковых систем. Использование очков для получения стереоизображений создает дискомфорт наблюдателю, особенно в случае, когда он вынужден использовать вторую пару очков [145].

В работе [146] описан нашлемный стереодисплей, а в работах [147, 148] – пути улучшения эксплуатационных характеристик таких дисплеев. Такие дисплеи создают трехмерные изображения за счет пространственного разделения стереопары. Каждый глаз благодаря системе линз видит свой собственный миниатюрный монитор, размещенный в шлеме. Возможны два варианта: изолированный, когда человек не может видеть ничего, кроме изображения, и открытый, с полупрозрачным экраном, когда пользователь не теряет визуального контакта с окружающим миром. Обычно эти устройства содержат и датчики положения, позволяющие отслеживать движения головы пользователя. Именно в механизме контроля движений заключены все преимущества и недостатки подхода. Являясь недостаточно точным, он часто вызывает неадекватную реакцию системы,

однако отсутствие механизма обратной связи приводит к нежелательному мышечному напряжению в результате неестественного положения головы пользователя.

Кроме того, вследствие ограничений по массе и размерам носимые решения в основном страдают от низкого разрешения. Этого недостатка лишены дисплеи, представляющие собой массивные устройства высокого разрешения, которые закрепляются на подвижном манипуляторе с шестью степенями свободы. Человек контролирует положение дисплея руками примерно так, как обычно наводят на цель бинокль. В обеих вышеописанных реализациях в полной мере дает о себе знать отсутствие связи между аккомодацией и конвергенцией: глубина всех точек изображения зафиксирована в одной плоскости, которую можно с помощью оптики искусственно разместить на любом удалении. В японской лаборатории ATR Labs создали новый вариант нашлемного дисплея с дополнительными передаточными линзами, контролируя которые система в состоянии динамически подстраивать воображаемую дистанцию до изображения. В сочетании с отслеживанием положения зрачков становится возможным предлагать глазу то расстояние до предмета, которое соответствует конвергенции.

Японскими учеными была предложена модификация стереоскопического дисплея, основанная на атмосферной теории перспективы (рис.67) [149-151].

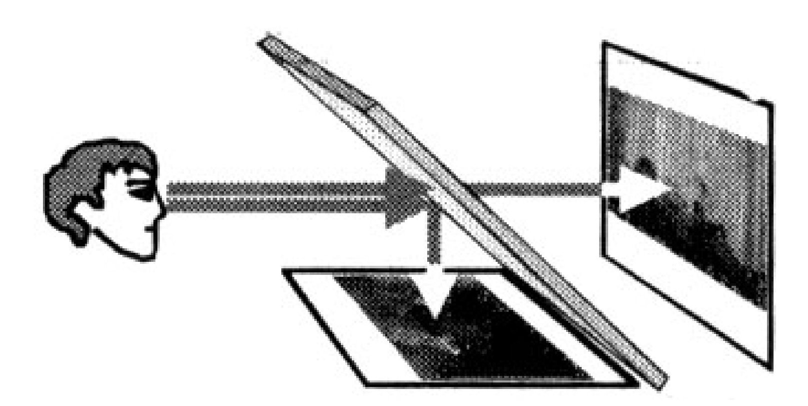


Рис.67. Схема стереоскопического дисплея, основанная на атмосферной теории перспективы [149-151].

Если два одинаковых изображения отображать на горизонтальном и вертикальном экранах, расположенных на одинаковом расстоянии от наблюдателя, то он с помощью полупрозрачного зеркала будет воспринимать их находящимися на одинаковом расстоянии. Но, если ввести слабо рассеивающий элемент, например, между вертикальным экраном и полупрозрачным зеркалом, то тогда наблюдатель будет воспринимать изображение, представленное на вертикальном экране, расположенным на большем

расстоянии, чем расположенное на горизонтальном экране. Здесь используется закон атмосферной теории перспективы, открытый еще Леонардо да Винчи, гласящий, что «различимость объекта ухудшается с увеличением расстояния до него» [152]. На этой основе он разработал особую технику живописи chiaroscuro (сфумато), которая пять столетий спустя была использована при построении стереоскопических дисплеев.

5.3. Автостереоскопические дисплеи

Автостереоскопические дисплеи не требуют использования очков. Когда наблюдатель находится в нужном положении, каждый глаз в зоне, называемой окном наблюдения, видит различное изображение. Два изображения складываются в мозгу, создавая впечатление объема. Различные оптические элементы используются для решения этой задачи. Для всех этих дисплеев наблюдатель должен находиться на определенном от них расстоянии для исключения совпадения изображений.

На рис.68 показан ракурс, при котором плоскость наблюдения параллельна плоскости дисплея.

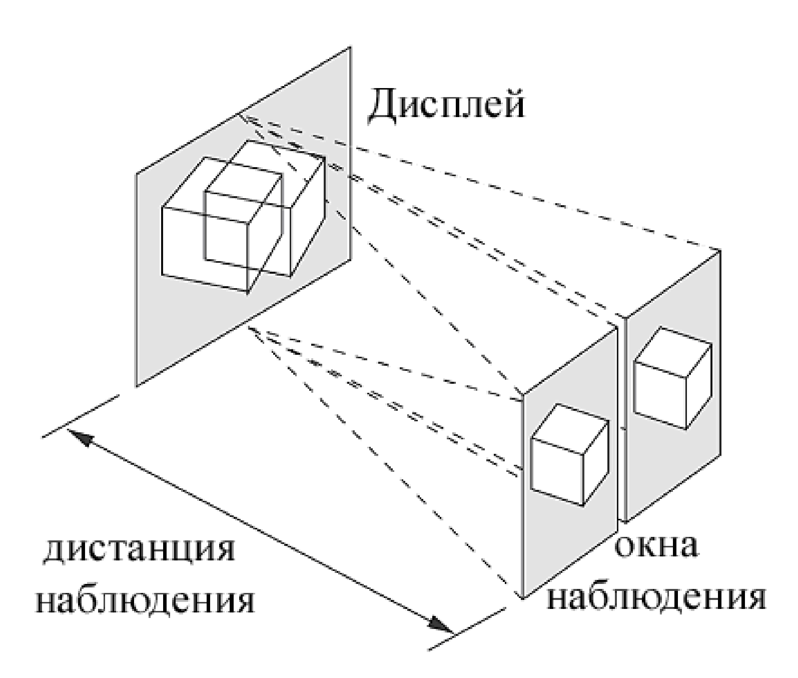


Рис.68. Принцип автостереоскопического дисплея. Когда наблюдатель находится в нужном положении, каждый глаз видит различное изображение. Два изображения складываются в мозгу, создавая впечатление объема [125].

Различают три типа автостереоскопических дисплеев; с фиксированными окнами наблюдения, с возможностью перемещения наблюдателя (рис.9.40) и с несколькими ракурсами наблюдения (рис.69) [125].

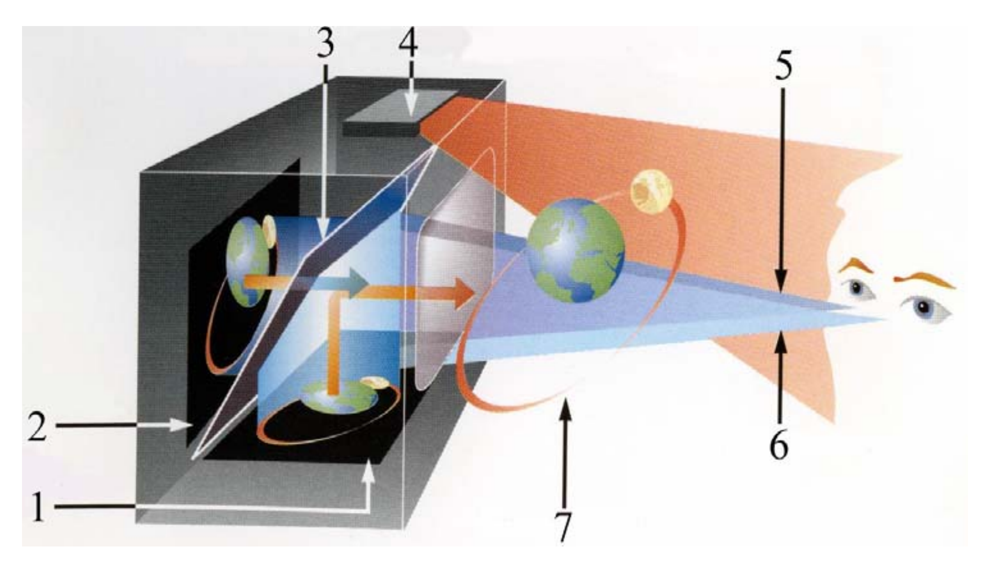


Рис.69. Автостереоскопический дисплей: 1, 2 – панели ЖКД; 3 – экран; 4 – датчик положения оператора; 5, 6 – угол обзора; 7 – трехмерное изображение.

Панели ЖКД 1 и 2 (рис.69) формируют независимые изображения соответственно для правого и левого глаза. Они собираются экраном 3 и представляются для наблюдения. Датчик положения оператора 4 согласует положение изображений на экране 3 с расположением глаз оператора. В результате в углах обзора 5 и 6 наблюдатель воспринимает трехмерное изображение 7.

Дисплей с несколькими фиксированными окнами наблюдения может быть использован несколькими наблюдателями одновременно, воспринимающими изображения с помощью различных стереопар (рис.70).

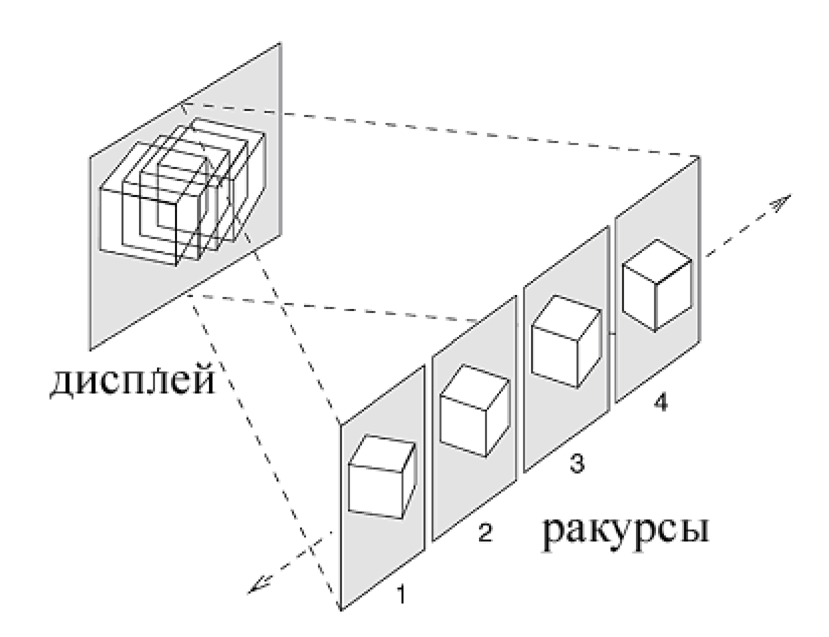


Рис.70. Дисплей с четырьмя окнами наблюдения. Соседние ракурсы (1 и 2, 2 и 3, 3 и 4) создают стереопары [125].

Обзор автостереоскопических дисплеев приведен в работах [153, 154]. Любой тип матричных ЖКД может быть использован в объемных дисплеях при добавлении некоторых оптических элементов. На рис.71 показан *дисплей с параллаксным барьером*, использующий вертикальные непрозрачные полоски, перекрывающие доступ света к наблюдателю [155]. Изменением геометрии барьера подбираются положения окон и углов наблюдения. Недостатком этих дисплеев является снижение их яркости за счет наличия барьера.

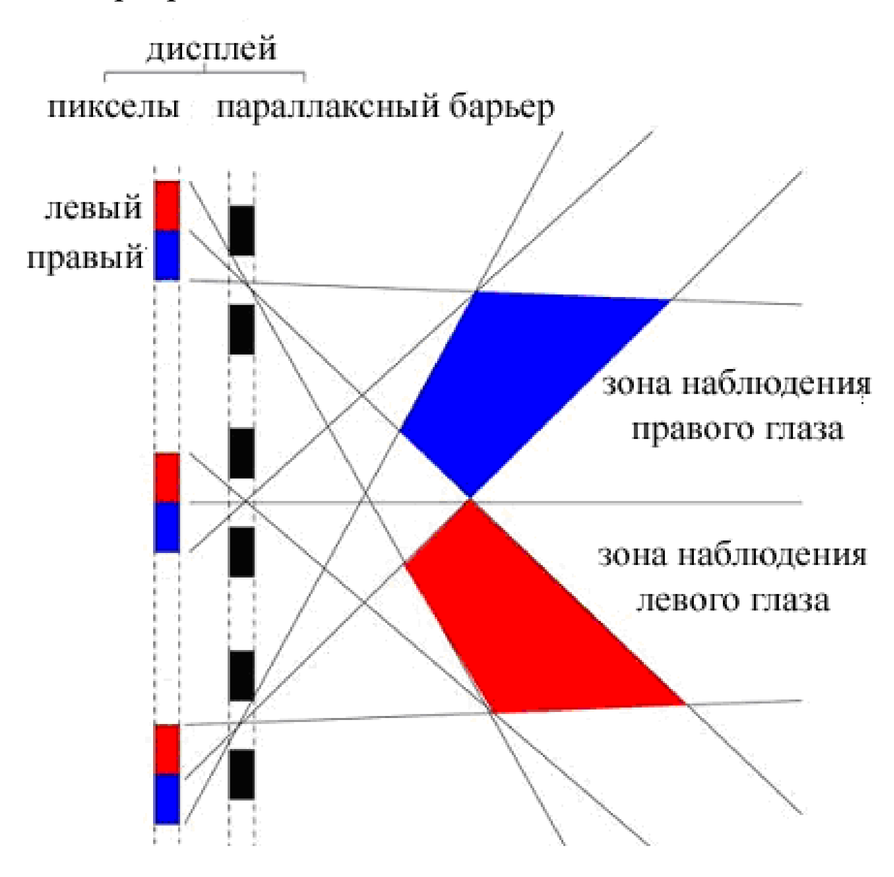


Рис.71. Дисплей с параллаксным барьером [156].

Растровый дисплей, использующий массив миниатюрных линз, показан на рис.72 [156]. Растры часто наклоняют, чтобы увеличить переходы между зонами наблюдения дисплея. Основное достоинство растров состоит в передаче полной яркости.

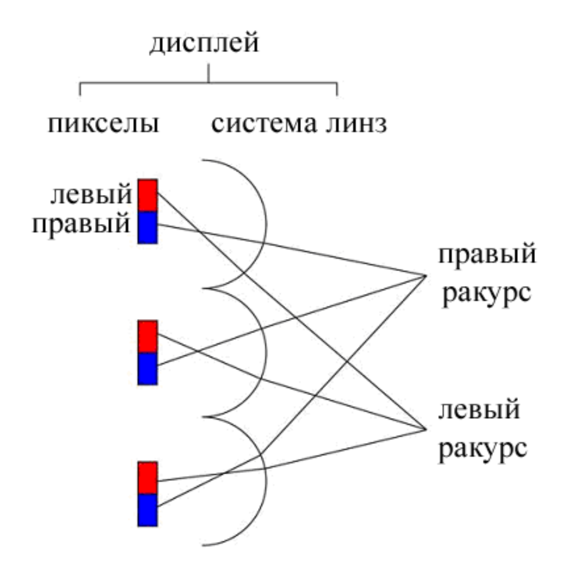


Рис.72. Растровый дисплей.

Формирование трехмерного изображения при помощи сфокусированных в точки аспектов изображаемой сцены

В работах [157, 158] рассмотрен метод формирования трехмерного изображения посредством сканирования пространства лазерным лучом, который проецирует разные аспекты трехмерной сцены наблюдателю. На первом этапе записывается система аспектов изображаемой сцены, на втором – совокупность аспектов трансформируется в систему так называемых субаспектов. На этапе проекции субаспекты просвечиваются сфокусированным в точку лазерным пучком. Сканируя экран, такой пучок образует матрицу светящихся точек. Показано, что, наблюдая такую матрицу, наблюдатель видит локализованное на экране двухмерное изображение. При изменении точки наблюдения конфигурация представленного на экране изображения также изменяется, имитируя изменения аспектов сцены, которые имеют место при наблюдении реального трехмерного объекта. В результате у наблюдателя возникает иллюзия трехмерности проецируемого изображения. Отмечено, что процесс сканирования экрана системой сфокусированных в точки аспектов сцены эквивалентен одновременному сканированию экрана системой независимых тонких световых пучков, каждый из которых проецирует на экран свой присущий ему аспект сцены. Рассмотрен вариант дисплея, который воспроизводит только горизонтальные параллаксы трехмерной сцены. Показано, что в этом случае зрительская зона должна быть расширена в вертикальном направлении с помощью одномерного диффузного экрана. Рассмотрен режим работы дисплея, когда сканирующий пучок управляется обычным телевизионным сигналом. Показано, что дисплей совместим с современной системой телевидения.

Последовательно-временные дисплеи используют изменение направления света от задней подсветки [159]. В первый момент времени свет направлен в левый глаз и наблюдается левое изображение. В следующий мо-

мент свет направлен в правый глаз и наблюдается правое изображение. За счет объединения двух ракурсов наблюдается объемное изображение. Недостатком является удвоение времени смены изображения, поэтому для видеоряда необходимо увеличение частоты до 120 Гц. Использование таких частот ограничено временами отклика современных ЖКД.

Нашлемные дисплеи относятся к дисплеям очкового типа [160-164]. Они широко используются в системах отображения виртуальной реальности. Каждый глаз видит отдельный размещенный непосредственно перед ним небольшой дисплей с диагональю менее 2,4 мм. Такой нашлемный дисплей может создавать стереоизображение высокого разрешения. Длительное использование такого дисплея приводит к утомляемости наблюдателя. Эти дисплеи не позволяют выполнять дополнительные операции, например, ведение записей.

5.4. Голографические дисплеи

Голографические дисплеи строятся на отображении динамических голограмм [165]. Они имитируют пространственное размещение световых волн в таком виде, как они располагались бы при отражении света от реального трёхмерного объекта, и дают наиболее качественное трехмерное изображение, поскольку не имеют противоречия между аккомодацией и конвергенцией. При этом изображение может наблюдаться под разными углами несколькими наблюдателями [166]. Для наблюдения голограмм в реальном времени необходимо обеспечение очень большой полосы пропускания. Для стационарных полноцветных дисплеев высокого разрешения эта величина составляет порядок 100 Тб/с. Были разработаны некоторые методы параллельной обработки изображений, однако разрешение остается низким [167].

Появление первых голографических дисплеев относится к 90-м годам прошлого столетия. В работах [168, 169] было показано, что голографические изображения высокого разрешения можно отображать с помощью обычного ЖКД с углом поля зрения 4°. Для увеличения поля зрения необходимо существенное увеличение разрешающей способности, что не осуществимо активно матричными ЖКД на нематиках. Использование дисплеев на С*ЖК позволяет увеличить поле зрения [170]. Для обеспечения угла обзора 20° необходимо разрешение 2,5 мк, что требует осуществления модуляции с частотой 2 гГц.

Для отображения цветных динамических голограмм используются акустооптические модуляторы [171]. В работе [172] сообщается о разработке 3Д дисплея, основанного на использовании голограмм, создаваемых компьютером.

Из-за использования лазерной подсветки эти дисплеи чаще бывают монохромными. Стоит отметить, что на сегодняшний день уже существуют прототипы голографических видео дисплеев, которые используют жидкокристаллические фильтры, подобные тем, что составляют матрицу современных ЖК-мониторов [173]. Вместо отражения и создания интерференционной картины эти мониторы рассеивают свет, что и приводит к формированию псевдо трехмерного изображения. Недостатком этого типа ЖК голографических видео дисплеев является то, что они проецируют зрителю голограмму, «нарезанную» на части вместо того, чтобы представить единый трехмерный рисунок. Это не позволяет рассматривать голограмму под разными углами и делать ее доступной для просмотра сразу несколькими людьми.

Ученые из Университета Южной Калифорнии сообщают о разработке голографического дисплея, создающего трехмерную голограмму (при наблюдении в горизонтальной плоскости), которую можно обозревать с любой стороны (рис.73). В состав дисплея входят: быстро вращающееся зеркало, покрытое анизотропным голографическим диффузором; микроконтроллер, отвечающий за декодирование видеосигнала, передаваемого посредством стандартного дисплея; высокоскоростной видеопроектор и обычный персональный компьютер. При этом разработчики отмечают, что их решение позволяет видеть трехмерную картинку, не используя специальных очков, с любой точки и неограниченному количеству зрителей.

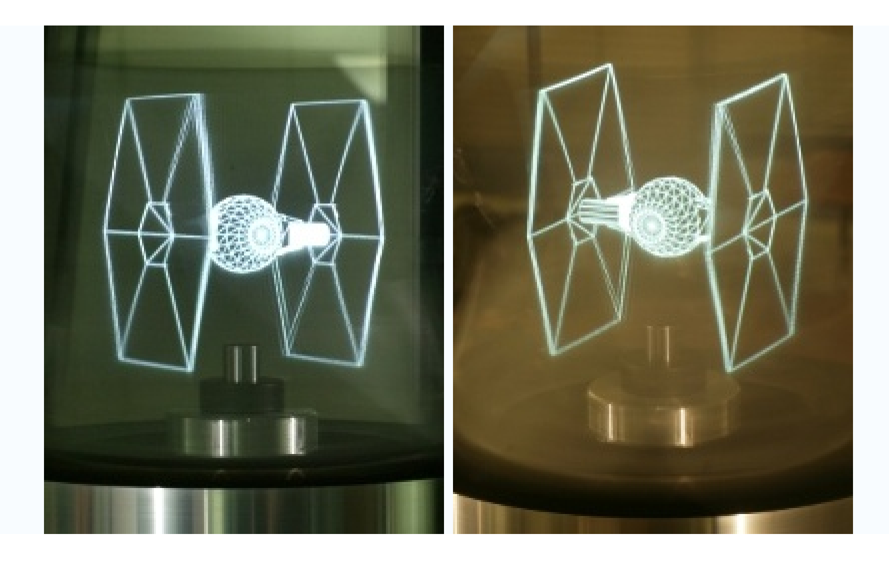


Рис.73. Изображение, получаемое с помощью голографического дисплея, разработанного в университете Южной Калифорнии.

Характеристики получаемого изображения: частота обновления – 15–20 Гц; разрешение 768 × 768 пикселей; угловое разрешение 1,25°; диаметр изображения 13 см; скорость вращения экрана 900–1200 об/мин; количество отображаемых цветов – 2. За формирование трехмерной картинки отвечает видеокарта, создающая более 5000 изображений трехмерного

объекта в секунду. Изображения проецируются на быстро вращающееся зеркало при помощи высокоскоростной проекционной системы. Необходимо отметить разработку исследователями специального алгоритма, который обеспечивает корректное отображение картинки, независимо от места расположения наблюдателя и его расстояния до голографического дисплея.

Недостатками голографических дисплеев является техническая сложность на пределе современных возможностей аппаратуры и ограниченность вычислительных мощностей, которых хватает только для статических изображений.

5.5. Ретинальные дисплеи

Особый интерес представляют ретинальные дисплеи (РД), формирующие изображения непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя [174]. В предшествующих моделях изображение формировалось непосредственно перед глазом пользователя на маленьком экране, обычно в виде больших очков. Неудобство этих систем было связано с малым углом обзора, большим весом устройств, необходимостью фокусировки глаза на определенной глубине и низкой яркостью. Первые образцы РД были созданы в Университете Вашингтона в 1991 году. При проекции изображения на оба глаза, создаются реалистичные трехмерные сцены. Эти дисплеи позволяют осуществлять динамическую перефокусировку изображений, что обеспечивает более высокий уровень реализма, чем у классических шлемов виртуальной реальности.

Схема РД приведена на рис74. Оптический сигнал от источника излучения 1 сканером 2, управляемым интерфейсом 3, направляется на сетчатку глаза 4. Ретинальные дисплеи не требуют создания изображения на промежуточном носителе, могут использоваться в условиях больших внешних засветок. Проецирование изображения непосредственно на сферическую поверхность сетчатки создает условия для устранения оптических искажений при проецировании больших полей трехмерного пространства, снижает искажения на краях изображений и позволяют сократить оператору время для принятия решений в экстремальных условиях.

В отличие от обычных нашлемных дисплеев, построенных на базе миниатюрных LCD-дисплеев, РД дисплей не перекрывает поле зрения, а накладывает свою картинку на видимое пользователем изображение реального мира. РД имеет очень малый вес, что позволяет располагать их на оправе очков (75) [175]. Достоинствами этих дисплеев являются: большой угол обзора (более 120°); высокое пространственное разрешение; высокое качество отображения цветов, высокие яркость и контрастное отношение,

а также создание возможность объемного изображения с большой пространственной глубиной.

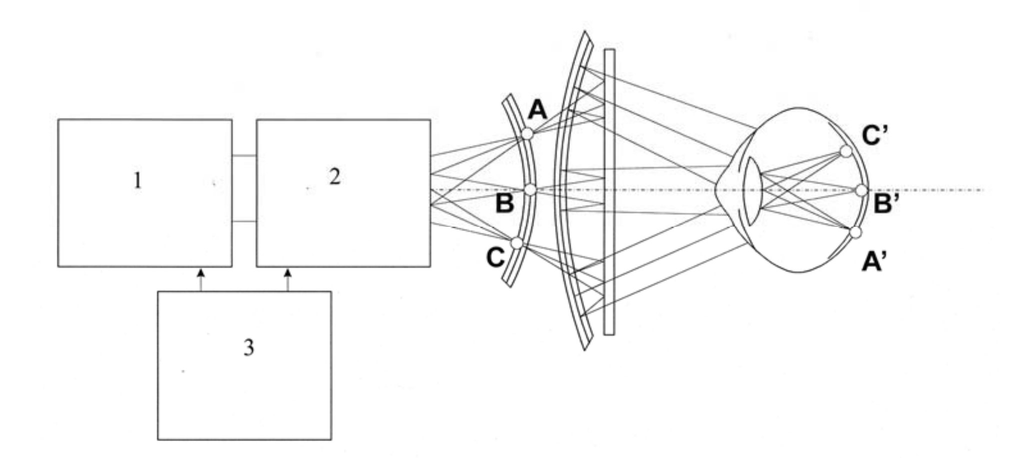


Рис.74. Схема ретинального дисплея: 1 – источники излучения; 2 – сканеры; 3 - интерфейс [174].

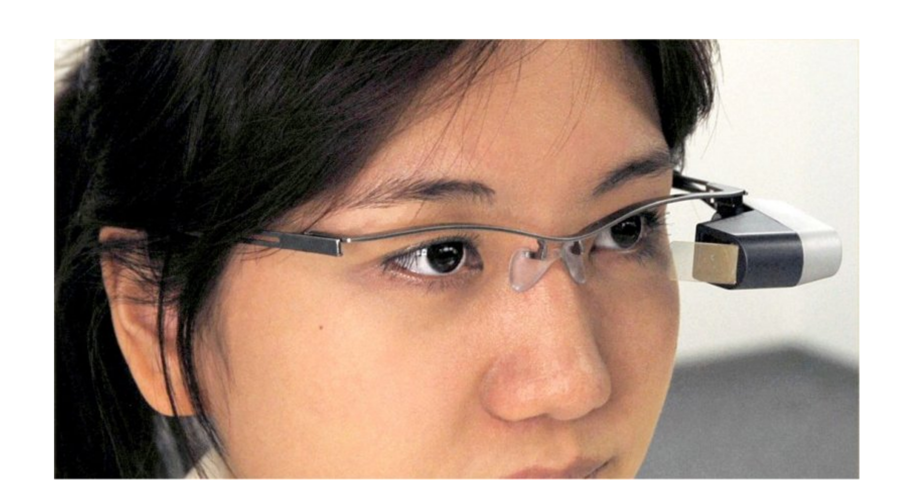


Рис. 75. Ретинальный дисплей, размещенный на оправе очков. Разработка фирмы Brothers Industries, LTD (Япония) [175].

Ретинальные дисплеи первоначально были созданы для военного использования. В настоящее время они используются в армии США. Командир подразделения получает изображение от бортового компьютера с помощью ретинального монитора, закрепленного на шлеме. Это используется для более эффективного слежения за обстановкой на поле боя и получения тактической информации. Подобное устройство также используется пилотами новых моделей американских вертолетов.

Система может использоваться и в хирургии. Хирург проводит операцию, одновременно отслеживая показатели здоровья пациента. Также дисплей может помочь в хирургической навигации — врач во время операции сможет видеть наложенное томографическое изображение органа.

Создание в последние годы беззеркальных микролазеров на ЖК с распределенной обратной связью на эластичной подложке могут ускорить практическую реализацию таких дисплеев.

Панорама современных дисплейных технологий демонстрирует широкое многообразие используемых материалов, принципов и конструкций, обладающих набором различных эксплуатационных параметров. Необходимость измерения рабочих характеристик дисплеев привела к развитию методов и аппаратуры для метрологии [176, 177]. Важнейшим событием 2010 г. явилось начало коммерческой демонстрации ТВ передач с объемным изображением на основе использования стереоэффекта с применением очков. При всем многообразии систем отображения информации мечта разработчиков о создании простого и более дешевого дисплея с высокими эксплуатационными параметрами для широкого назначения стимулирует продолжение работ в этой передовой области прикладной оптики.

Заключение

В настоящее время ЖКД составляют почти 85% от объема выпуска всех плоских информационных дисплеев. Это объясняется их высокими характеристиками, достигнутыми за счет развития теории жидких кристаллов и передовых технологий. ЖКД характеризуются высоким контрастом, позволяющим воспринимать отображаемую информацию в широком диапазоне освещенности и углов обзора; высоким пространственным и временным разрешением; широким диапазоном отображаемых цветовых параметров и оттенков (шкалы) серого, позволяющим получать изображения максимально соответствующим отображаемым объектам.

Следует отметить широкий диапазон размеров экранов в зависимости от назначения: малые – для автономных переносных устройств индивидуального пользования; большие – для стационарных устройств коллективного пользования. Широкий интервал температур эксплуатации (раггедизация, т.е. подогрев при работе в области отрицательных температур до -60°С), низкая потребляемая энергия, позволяющая использовать малогабаритные маломощные автономные источники питания, долговечность в дополнение к основным их характеристикам обеспечили возможность применения ЖКД в качестве телевизионных экранов, мониторов компьютеров, дисплеев мобильных телефонов, электронных часов, навигаторов, записных книжек и многих других устройств отображения информации. Высокая технологичность и низкая стоимость ЖКД способствуют их массовому выпуску.

Различают просветные, отражательные и полупрозрачные (прозрачно-отражательные) устройства. Просветные ЖКД используют заднюю подсветку для освещения ЖК экрана, обеспечивая высокую яркость и контрастное отношение. Они имеют ограниченный угол обзора и более пригодны для индивидуального пользования, например, в ноутбуках и игровых приставках. Использование фазовых компенсаторов в просветных ЖКД прямого видения увеличивает угол обзора, что позволяет применять их в качестве экранов для настольных компьютеров и телевизоров. Просветные дисплеи могут использоваться в качестве проекционных. Отражательные дисплеи также разделяют на дисплеи прямого видения и проекционные. Дисплеи прямого видения не нуждаются в задней подсветке, и потому являются более легкими и потребляющими меньше энергии. Их основной недостаток – трудность считывания информации при низкой освещенности. Отражательные дисплеи более пригодны для проекционного телевидения при использовании микродисплеев на кремнии (LCoS). Для них требования к углам поля зрения не столь высоки, как для дисплеев прямого видения. Полупрозрачные дисплеи объединили в себе характеристики тех и других. Так, при низкой освещенности включается задняя подсветка,

и дисплей работает на просвет; при высокой освещенности подсветка выключается и дисплей работает на отражение.

При разработке ЖКД широкое использование нашли твист-эффект, супертвист, селективное отражение в холестерико-нематических смесях, эффекты в сегнетоэлектрических С*ЖК и бистабильные эффекты. Наилучшие эксплуатационные характеристики достигнуты при использовании твист-эффекта с поперечным приложением электрического поля (твист, переключаемый в планаре, - IPS) и мультидоменных вертикально ориентированных мод (VA). Бистабильные дисплеи сохраняют изображение без потребления энергии после переключения и сверхмалую потребляемую энергию, например, от миниатюрных солнечных батарей. Показана возможность создания ЖКД на эластичной основе.

ЖКД для отображения трехмерных объектов принято классифицировать на объемные (volumetric), голографические, стереоскопические и автостреоскопические. Широкого расширения практического применения этого класса дисплеев следует ожидать в ближайшие годы. Жидкие кристаллы могут найти применение для создания ретинальных дисплеев.

Приведенные сведения о ЖКД позволяют отнести их к новой самостоятельной интенсивно развивающейся области современной фотоники.

Список литературы

1. Bahadur D. Liquid crystal displays. N.-Y.: Gordon and Breach. 1984; Liquid crystals – applications and uses / Edited by B. Bahadur. Toronto. Canada. 1990. Vol.1. 604 p.; 1991. Vol.2. 448 p.; 1992. Vol.3. 424 p.
2. O'Mara W.C. Liquid crystal flat panal displays: manufacturing science and technology. N.-Y.: VNR. 1993. 223 p.
3. Display systems / Ed. L.W. MacDonald and A.C. Lowe // J. Wiley, 1997. Chichester. 418 p.
4. Stupp E.H., Brennesholtz M.S. Projection displays. Wiley. SID Series in Display Technology. 1999. 418 p.
5. Robinson M.G., Chen J., Sharp G.D. Polarization engineering for LCD projection. John Wiley & Sons Ltd. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 2005. 290 p.
6. Yen P., Gu C. Optics of Liquid crystal displays. John Wiley & Sons, Ltd. 1999. 452 p.
7. Chigrinov V.G. Liquid crystals devices. Physics and application. Artech House optoelectronics library. Boston, London. 1999. 357 p.
8. Burden A.P. Materials on displays // Materials World, 2000. P. 22-25.
9. Luder E. Liquid crystal displays. Addressing schemes and electro-optic effects. JOHN WILEY & SONS, LTD. Series in Display Technology. Chichester. 2001. 352 p.
10. Wu S-T., Yang D.-K. Reflective LC displays. JOHN WILEY & SONS, LTD. Series in Display Technology. Chichester. 2001. 335 p.;
11. Yang D.-K., Wu S.-T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. John Wiley & Sons. 2006. 387 p.
12. Kelly S. Materials science of liquid crystals. Taylor & Francis. 2003.
13. Fisch M.R. Liquid crystals, laptops and life. World scientific series in contemporary chemical physics. 2004. Vol.23. 367 p.
14. Томилин М.Г. Передовые дисплейные технологии // Опт. журн. 2003. Том.70, №7. С.4-17.
15. Tani C. Display big-bang and hyperrealistic display for next era // Proc. ASID'00. Xi'an. 2000. P.5-10.
16. Томилин М.Г. Информационные дисплеи на ЖК // Опт. журн. 1998. Том.65, №7. С.64-76.
17. Bogdankevich O., Sadchikhin A., Sozinov S. Research of projection systems on the basis of quantoscopes (laser CRTs) // Proc. of 10-th Symp. on Advanced Display Technologies. Minsk, 2001. P.177-180.
18. Ламанов А., Ламанов М., Шешин Е., Щука А. Экраны на основе автоэлектронной эмиссии – перспективные устройства отображения информации // Инженерная микроэлектроника. 2005. №9. С.10-12.

19. Горфинкель Б., Абаньшин Н., Коровкин А. и др. Плоские экраны низковольтной катодолюминесценции // Электр. комп. 2002. №1. С.43-44.
20. Гиваргизов Е.И. Плоские автоэмиссионные лампы для подсветки ЖК дисплеев и автоэмиссионные дисплеи на основе кремниевых острий, покрытых алмазом// Опт. журн. 1999. Том 66. № 6. С. 77-80.
21. Burden A.P. Materials on displays // Materials World, 2000. - P. 22-25.
22. Ghrayeb J., Jackson T.W., Daniels R., Hooper D.G. Review on field emission display potential as a future (leap-frog) flat panel technology // SPIE. 1997. Vol.3057. P.237-248.
23. Curtin C., Infante C. Fundamentals of emissive displays // SID short courses S-3. 1997. Boston, Massachusetts. 80 p.
24. Беляев В.В. Современные электронные дисплеи // Электр. комп. 2002. №1. С. 24-28.
25. Воронов А.А., Дедов В.П. Принципы построения и проблемы совершенствования плазменных дисплеев // Опт. журн. 1999. Том 66, № 6. С.64-73.
26. Рахимов А.Т., Рой Н.Н., Коган Б.В. Новое поколение плазменных экранов коллективного пользования // Опт. журн. 1999. Том 66, № 6. С.74-76.
27. Shinoda T., Tolner H. Fundamentals of color-plasma display manufacturing // SID short courses S-2. 2004. Seattle, Washington. 76 p.
28. Трофимов Ю. Светодиодная элементная база – некоторые особенности и проблемы применения в дисплейных технологиях // Электр. комп. 2002. №1. С.29-34.
29. Коган Л.М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов. Новости светотехники №7./ Под ред. Ю.Б. Айзенберга // М: Дом света. 2001.
30. Абаньшин Н., Горфинкель Б., Жуков Н., Кустов В., Кузнечихин А. Плоскопанельные дисплеи на органических светоизлучательных структурах // Электр. комп. 2005. №10. С.57-59.
31. Forrest S. Fundamentals of organic light-emitting devices // SID short courses S-2. 2002. Boston, Massachusetts.171 p.
32. Ghosh A., Hack M. Fundamentals of organic light-emitting devices // SID short courses S-1. 2004. Seattle, Washington. 90 p.
33. Томилин М.Г., Гольдин К.Р., Лебедев В.И. и др. Современные средства индикации любительских фотоаппаратов и перспективы их развития // Журнал оптико-мех. пром. 1977. №11. С. 62-69.
34. Brody T.P. Birth of the active matrix // Information Display. 1997. Vol.13, № 10. P.28-32.
35. Schadt M. The history of LCD and LCM technology // Liquid Crystals. 1989. Vol.5, № 1. P.57-71.
36. Kelker H. History of LCs // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1973. Vol.21. P.1-48.

37. Becker W., Lemp H.-J. 100 years of commercial LC materials // Information Display. 2004. Vol.20, № 20.
38. Грошев А.А., Сергеев В.Б. Устройства отображения информации на основе жидких кристаллов. Л., Изд. Энергия. Библиотека по автоматике. 1977. Вып. 570. 80 с.
39. Fergason J.L. Display system utilizing a LC material of the cholesteric phase. 1968. US Pat., № 3410999.
40. Schadt M., Helfrich W. Voltage-dependent optical activity of twisted NLC // Appl. Phys. Lett. 1971. Vol.18. P.27.
41. Gray G.W., Harrison K.J., Nash J.A. New family of NLCs for displays // Electr. Lett. 1973. Vol.9. P.130-131.
42. Luder E. Fundamentals of passive- and active-addressed LC displays // SID short courses S-1. 1997. Boston, Massachusetts. 111 p.
43. De Boer W. Fundamentals of AMLCDs // SID short courses S-1. 2002. Boston, Massach. 98 p.
44. Scheffer T.J., Nehring J., Jang J. Fundamentals of LCDs // SID short courses S-3. 2004. Seattle, Washington. 103 p.
45. Gooch C.H., Terry H.A. The optical properties of twisted NLC structures with twist angles > 90º // J. Phys. D: Appl. Phys., 1975. Vol.8. P. 1575-1584.
46. Цветков В.А. Жидкие кристаллы в авиационной технике // Зарубежн. радиоэлектр. 1983. Т.2. С.28-44.
47. Warren R. et al. Horizontal diplopia threshholds for head up displays // AFAMRL 1984. doct. AD-A141965.
48. Arbak C. Utility evaluation of a helmet mounted display and sight // Proc. SPIE. 1998. Vol. 1116. P.138.
49. Brooks R. Helmet mounted display for tank applications // in Imaging Sensors and Displays. Proc. SPIE. 1987. Vol. 765. P.19.
50. Moffitt K. Ocular responses to monocular and binocular helmet mounted display configurations // in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol 1116. P.142-148.
51. Amitai, Y. et al. Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays // Applied Optics.1989. Vol.28. P.3405.
52. Browder G. Evaluation of a helmet-mounted laser projector display // in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol. 1116. P.85.
53. Burbidge,D. and Murray,P. Hardware improvements to the helmet mounted projector // in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol.1116. P.52-60.
54. Thomas M. et al. Fiber optic development for use on the fiber optic helmet mounted display" in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol.1116. P.90.
55. Gibson C. Binocular disparity and head up displays // Human Factors. 1980. Vol. 22. P.435-444.

56. Rebo R. A helmet mounted virtual environment display system // AFIT. 1988. doct. AD-A203055.
57. Peli E. Visual issues in the use of a head mounted monocular display // in Visual Communications and Image Processing IV. Proc. SPIE. 1989. Vol.1199. P.1164-1176.
58. Melzer J., Moffitt K. Partial binocular overlap in helmet mounted displays // in Display System Optics II. Proc. SPIE. 1989. Vol. 1117. P.56-62.
59. Robinson R., Thomas M. Eyetracker development on the fiber optic helmet mounted display // in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol.1116. P.102-108.
60. Robinett W., Rolland J. A computational model for the stereoscopic optics of a head mounted display // in J. Merritt & S. Fisher (Eds.) Stereoscopic Displays and Applications 2. Proc. SPIE. 1991. Vol.1457. P.140-160.
61. Rallison R., Schicker S. Combat vehicle stereo HMD // in Large Screen Projection, Avionic and Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1992. Vol. 1456.
62. Melzer K., Moffitt K. An ecological approach to partial binocular overlap // in Large Screen Projection, Avionic and Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1992. Vol.1456.
63. Bohm D. et al. Helmet mounted sight and display testing // in Large Screen Projection, Avionic and Helmet Mounted Displays. 1992. Proc. SPIE Vol. 1456.
64. Rash C.E. Helmet-mounted displays: design issues for rotary-wing aircraft // SPIE Press. 2001. Vol. PM_{93}. 258 p.
65. Ong H., Woodard O., Cheong N., Reese C. A new normally black, high contrast, wide symmetrical viewing angle AMLCD for military head mounted displays and other viewer applications // Proceed. of SPIE. 2004. Vol.5442. P.301-
66. Беляев В., Жуков Н. Дисплеи с повышенной надежностью для авиации и военной техники // Электрон. компон. 2002. №2. С.20-23.
67. Krevor D., McNelly G., Skubon J., Speirs R. Development and manufacture of visor for helmet mounted display // Proc. of SPIE. 2003. Vol.5180.
68. Томилин М.Г. Нашлемные дисплеи // Опт. журн. 1999. Том 66. № 6. С. 81-87.
69. Shiva S., Kishino F. A new binocular parallax display method in which vergence changes are linked to accommodative responses // Digest Asia Display’95. 1995. P.785-788.
70. Shiva S., Omura K., Miyasato T. Displaying photographic images using 3D displays with accommodative compensation // Digest Asia Display’96. 1996. P.438-441.
71. Suyama S., Kato K., Nakajima H. 3DD with dual frequency LC varifocal lens // SID Intern. Symp. Digest of Techn. Papers. 1997. P.273-276.

72. Bauer G., Kiefer R., Klausmann H., et al. In-plane switching: a novel electro-optic effect // LC Today. 1995. Vol.5. P.13-14.
73. Томилин М.Г. Жидкие кристаллы: восхождение в третье тысячелетие // Опт. журн. 2001. Т.68, № 3. С.78-83.
74. Томилин М.Г. Какая дисплейная технология победит в битве за большой экран? // Опт. журн. 2004. Т.71. № 10. С.85-88.
75. Pauluth D., Tarumi K. Advanced LCs for television // J. Mater. Chem. 2004. V.14. P.1219-1219.
76. Сухариер А.С. ЖК индикаторы. М., Радио и связь. 1991. 256 с.
77. Севастьянов В.П., Аристов В.Л., Митрохин М.В. ЖК дисплеи: электрооптика, управление, конструкция и технологии. Минск. Микровидеосистемы. 1998. 508 с.
78. Kim K.-H., Song J.-K. Technical evolution of LCDs // Asia materials. 2009. Vol.1. № 1. P.29-36.
79. Schadt M. Liquid crystal materials and LCDs // Annu. Rev. Mater. 1997. Vol.27. P.305-379.
80. Scheffer T. J., Nehring J. A new highly multiplexable LCD //Appl. Phys. Lett. 1984. Vol.45. P.1021-1023.
81. Scheffer T. J., Nehring J. Supertwisted nematic (STN) liquid crystak display // Annu. Rev. Mater. 1997. Vol.27. P.555-583.
82. Kiefer R., Weber B., Windscheid F. and Baur G. In-plane switching of NLCs, Japan Displays. 1992. Vol. 92. P. 547.
83. Lee K.H., Song S.H., Yang S.M., Park S.H., Kim, J.K., Han J.K., Park I.C., and Lim Y.J. CRT like characteristics of 32' WXGA TFT-LCD by true vision advanced FFS pixel concept // SID Tech. Dig. 2005. Vol. 36. P. 1742.
84. Schiekel M. F., Fahrenschon F. Deformation of NLCs with Vertical Orientation in Electrical Fields // Appl. Phys. Lett. 1971. Vol.**19**. P.391.
85. Takeda A., Kataoka S., Sasaki T., Chida H., Tsuda H., Ohmuro K., Sasabayashi T., Koike Y., and Okamoto K. A Super-High Image Quality Multi-Domain Vertical Alignment LCD by New Rubbing-Less Technology // SID Symposium Digest of Technical Papers. 1998. Vol.29. Issue 1. P.1077-1080.
86. Koike Y., Okamoto K. Super High Quality MVA-TFT LCDs // Fujitsu Sci. Tech. J. 1999. Vol.35. P. 221-228.
87. Park S.B., Lyu J., Um Y., Do H., Ahn S., Choi K., Kim K-H., and Kim S.S. A Novel Charge-Shared S-PVA Technology // SID Symposium Digest of Technical Papers. 2007. Vol. 38. Issue 1. P.1252-1254.
88. Huang Y.-P. Huang W.-K., Tsao C.H., Su J.-J., Hou H-L., Chia-Yu Lee L.-L., Chang T.-R., Lin Y.-C., and Chen P.L. Additional Refresh Technology (ART) of Advanced-MVA(AMVA) Mode for High Quality LCDs // Soc. Inf. Display Int. Symposium Digest of Technical Papers. 2007. Vol. 38. P.1010.
89. Saitoh Y., Kimura S., Kusafuka K., Shimizu H. Optically compensated IPS mode TFT-LCD panel // SID Symp. Dig. of Techn. Papers. 1998. Vol.29. Issue 1. P.706-709.

90. Chen J., Kim K.-H., Jyu J.-J., Souk J.H., Kelly J.R., Bos P.J. Optimum film compensation modes for TN and VA LCDs // SID Symp. Dig. of Techn. Papers. 1998. Vol. 29. Issue 1. P.315-318.
91. Van Ewyk R.L., O'Connor I., Mosley A., Guddy A., Hilsum C., Blackburn C., Griffiths J., Jones F. Anisotropic fluorophors for LCDs // Display Techn. And Appl. 1986. Vol.7. № 4. P.155-160.
92. Lee B.W., Sagong D., Jeong G. LCDs: How fast is enough? // Soc. Inf. Display Int. Symp. Dig. of Techn. Papers. 2001. Vol.32. P.1106-1109.
93. Utsumi Y., Takeda S., Kagawa H., Kajita D., Hiyama I., Tomioka Y., Asakura T., Shimura M., Ishii M., Miyazaki K., and Ono K. Improved contrast ratio in IPS-Pro LCD TV by using quantitative analysis of depolarized light leakage from component materials // Soc. Inf. Display Int. Symp. Dig. of Techn. Papers. 2008. Vol.39. P.129-132.
94. Van Ewyk R.L., O'Connor I., Mosley A., Guddy A., Hilsum G., Blackburn G., Griffiths J., Jones F. Anisotropic fluorophors for LCD // Display Techn. and Appl. 1986. Vol.7. №4. P.155-160.
95. Greubel W. Bistability behaviour of texture in cholesteric liquid crystal in an electric field // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. P.5-7.
96. Yang D.-K., West J.L., Chein L.-C., Doane J.W. Control of reflectivity and bistability in displays using ChLCs // J. Appl. Phys. 1994. Vol.76 № 2. P.1331-1333.
97. Ma R.Q., Yang D.-K. Optimization of polymer-stabilized bistable black-white cholesteric reflective display // J. SID. 1999. Vol.7. P.61.
98. Feihong Yu, Qian W., Weimin P., Ye G., Huiguang C., Jun C., Haicheng G. Experimental realization of reflective bistable ChLCD with new driving scheme and low driving voltage // Acta Photonica Sinica. 2000. Vol.29. №5. P.420-425.
99. Cheng J., Boyd G.D. Threshold and switching characteristics of a bistable nematic liquid crystal storage display // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol.37. № 12. P.1072-1074.
100. Bos P.J., Watson P., Anderson J.E. et al. Status and trends in nematic bistable liquid crystals // Proc. EuroDisplay'99. Berlin. P.397-400.
101. Tanaka T., Sato Y., Inoue A et al. A bistable TN LCD driven by a passive-matrix addressing // Proc. Asia Display'95. P.259-262.
102. Marinot-Lagarde Ph., Dozov I., Pollosat E. et al. Fast bistable nematic display using monostable surface anchoring switching // SID'97 Digest. P.41-44.
103. Палто С.П. Электрооптика и фотоника ЖК // УФН. 2005. Т. 175, вып.7. С.784-790.
104. Barberi R., Durand G. // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 58. P.2907.
105. Bryan-Brown G.P., Brown C.V., Jones J.C. et al. Grating aligned bistable nematic device // SID'1997 Digest. P. 37-40.
106. Clark N.A., Lagerwall S.T. Sub-microsecond bistable electro-optic switching in LCs // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. P.899-901.

107. Wu S-T., Yang D.-K. Reflective LC displays. JOHN WILEY & SONS, LTD. Series in Display Technology. Chichester. 2001. 335 p.
108. Yang D.-K., Huang X.-Y., Zhu Y.-M. Bistable cholesteric reflective displays: materials and drive schemes // Annu. Rev. Mater. Sci. 1997. Vol.27. P.117-146.
109. Schott D.J. Reflective LCOS light valves and their application to the virtual displays // Euro Display'99. 1999. P.485.
110. Tarumi K., Bremer M., Geelhaar T. Recent LC material development for active matrix displays // Annu. Rev. Mat. Sci. 1997. Vol.27. P.423-441.
111. Томилин М.Г. Создание и обработка изображений с помощью ЖК // С.122-112. Takizawa K., Kikuchi H., Fujikake H., Namikawa Y., Tada K. Polymer-dispersed liquid crystal light valves for projection display // Opt. Eng. 1993. Vol.32. P.1781-1791.
113. Takizawa K., Fujii T., Kawakita M., Kikuchi H., Fujikake H., Yokozawa M., Murata A., Kishi K. Spatial light modulators for projection displays // Appl. Opt. 1997. Vol.36. №23. P.5732-5747.
114. Ong H.L. Microdisplay opportunity: small size, low power, big image, bright future // SPIE. 1998. Vol. 3560. P.1-12.
115. Kornev A.F., Pokrovsky V.P., Soms L.N., Stupnikov V.K., Tomilin M.G. New concept of combined laser-SLM projection display // Proc. 20 IDRC. 2000. Palm Beach, Florida, USA. P.108-110.
116. Kornev A.F., Pokrovsky V.P., Soms L.N., Stupnikov V.K., Tomilin M.G. New concept of the projection display // Abstracts of 9 IC Advanced Display technologies. Moscow 2000. P.67.
117. Корнев А.Ф., Покровский В.П., Сомс Л.Н. и др. Новые схемы лазерных жидкокристаллических проекционных дисплеев // Опт. журн. 2001. Том 68, № 9. С.16-18.
118. Томилин М.Г. Оптико-проекционные дисплеи для тренажеров // Опт. журн. 2003. Том 70. №7. С.53-58.
119. Brennesholtz M.S. Fundamentals of projection displays // SID short courses S-4. 1997. Boston, Massachusetts. 115 p.
120. Schmidt T.C. Fundamentals of projection displays // SID short courses S-4. 2002. Boston, Massachusetts. 95 p.
121. Fujikake H., Sato H. Current progress and technical challenges of flexible LCDs // Emerging LC Technologies IV. Edited by Liang-Chy Chien, Ming Hsien Wu. Proc. of SPIE. 2009. Vol.7232. 723202-1-8.
122. Montbach E., Davis D.J., Khan A., Schneider T., Marhefka D., Pishnyak O., Ernst T., Miller N., Doane W. Novel Flexible Reflex™ Displays // Emerging LC Technologies IV. Edited by Liang-Chy Chien, Ming Hsien Wu. Proc. of SPIE. 2009. Vol.7232. 723203-1-8.
123. Валюс Н.А. Стереоскопия. М.: Изд-во АН СССР. 1962. 379 с.
124. Selected papers on thee-dimensional displays. Editor – Stephen A. Benton. SPIE milestone series. 2001. Vol. MS 162. 431 p.

125. Hill L., Jacobs A. 3D LCD and their applications // Proceed. of the IEEE. 2006. Vol.94. № 3. P.575-590.
126. Pastoor S., Wopking M. 3D-display: A review of current technologies // Displays. 1997. Vol.17. P.100-110.
127. Balasubramonian K. et al. Analysis of selected volumetric 3D imaging systems // in J. Ebbeni and A. Monfils (Eds.) Three Dimensional Imaging. Proc. SPIE. 1983. Vol 402. P.107-13.
128. Balasubramonian K et al. Compatible volumetric 3D TV systems: a proposal // Applied Optics. 1981. Vol.20. P.3906-3911.
129. Soltan,P. et al. Laser Based 3D Volumetric Display System // in E. Schlam (Ed.) High Resolution Displays and Projection Systems. Proc. SPIE. 1992. Vol. 1554.
130. Voronov A.V., Golovkov A.A., Kuznetsov S.V. Image formation in 3D laser display // Hardware for pattern recognition, image analysis and signal processing. 1996. Vol.6. № 4. P.823-826.
131. Аснис Л.Н., Воронов А.В., Головков А.А., Кузнецов С.В. Объемный лазерный дисплей с акустическими дефлекторами // Опт. журн. 1996. №12. С. 66-69.
132. Favalora G., Lewis D. Spatial 3D visualization: the end of flat-screen thinking // Presented at the US Display Concortium high information content display systems Symp. 2003. Arlington, VA.
133. Favalora G. Spatial 3-D. The death of the pixel // SPIE's oemagazine. January 2004. P.25.
134. Favalora G.E. Volumetric 3D displays and application infrastructure // Computer. 2005. Vol.38. P.37-44.
135. Grossman T., Balakrishnan R. Multi-finger gestural interaction with 3D volumetric displays // In Proc. UIST'04. ACM Press. 2004. P.61-70.
136. Grossman T., Balakrishnan R. The design and evaluation of selection techniques for 3D volumetric displays // In Proc. UIST'06. ACM Press. 2006. P.3-12.
137. Wilcox B. et al. A vision system for a Mars rover // in Mobile Robots II. Proc. SPIE Vol. 852, p172-179 Williams R. "Volumetric three dimensional display technology" in D. McAllister (Ed.) Stereo Computer Graphics and other True 3D Technologies. 1993.
138. Takada H., Suyama S., Hiruma K., Nakazawa K. A compact depth-fused 3D LCD // In SID Symp. Dig. Tech. Papers. 2003. Vol.34. №1. P.1526-1529.
139. Андреев А.Л., Бобылев Ю.П., Губасарян Н.А., Компанец И.Н., Пожидаев Е.П., Шошин В.М., Шумкина Ю.П. Рассеяние света в СЖК-модуляторах для объемных экранов // Опт. журнал. 2005. Том. 72. № 9. С.58.
140. Suyama S., Date M., Takada H. Three-dimensional display system with dual-frequency LC varifocal lens // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. Vol.39. P.480-484.

141. Самарин А. Современные технологии дисплеев объемного изображения // Современная электроника. 2005. №2. С.2-6.
142. Stavness I., Lam B., Fels S. pCubee: a perspective-corrected handheld cubic display // CHI. 2010. April. P.10-15.
143. Hopper D.G. Reality and surreality of 3-D displays: holodeck and beyond // Electronic IDC of SID, ExCel, London. 2000. Nov.21-23. P.1-10.
144. Motoki T., Isono H., Yuyama I. Present status of three-dimensional television research // Proc. IEEE. 1995. Vol.83. № 7. P.1009-1021.
145. Sextonand I., Surman P., Stereoscopic and autostereoscopic display systems // IEEE Signal Process. Mag. 1999. Vol.16. №.3, P.85-99.
146. Teitel M. The eyephone: a head mounted stereo display // in Stereoscopic Displays and Applications. Proc. SPIE.1990. Vol 1256. P.168-172.
147. Faris S.M. Micro-polarizer arrays applied to a new class of stereoscopic imaging // SID'91 Digest. 1991. P.840-843.
148. Okuda H., Chen J., Bos Ph. Possibility of stereoscopic displays by using a view angle dependence of twisted NLC cells // IEEE Trans. on electron devices, 1998. Vol. 45. № 4. P.1445-1452.
149. Ding S.-Q., Chen J.-Y., Li J.-L. The discovery of induced stereovision and its application // Proceed. of ASID'00. 2000. P. 87-90.
150.Suyama S., Takada H., Ohtsuka H., et al // Proceed. of SID'00. 2000. 54.1. P.1208-1211.
151. Suyama S., Takada H., Ohtsuka H., et al // Proceed. of SID'00. 2000. 53.3. P.1300-1303.
152. Tomilin M.G. Leonardo da Vinci and 3DDs. Programme & Abstracts of XIV Intern. Symposium 2005. Advanced Display Technologies. Oct. 10-14, 2005. Crimea, Ukraine. P.8-9.
153. Travis A. Autostereoscopic 3D display // Applied Optics. 1990. Vol 29. P.4341-4342;
154. Travis A. The display of three-dimensional video images // Proc. IEEE. 1997. Vol.85. № 11. 1817-1832.
155. Woodgate G., Harrold J., Jacobs A., Mosley R., Ezra D. Flat panel autostreoscopic displays – characterization and enhancement // Proc. SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII. 2000. Vol. 3957. P.153-164.
156. Morishima H., Nose H., Taniguchi N., Inoguchi K., Matsumura S. Rear cross lenticular 3-D display without eyeglasses // Proc. SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII. 1998. Vol. 3295. P.193-202.
157. Денисюк Ю.Н., Марков В.Б., Ганжерли Н.М. Проекция трехмерного изображения методом аспектов сфокусированных в точки // Опт. и спектр. 1998. Том 84, № 1. С.104-109.
158. Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М., Орлов В.В. и др. Проекция трехмерного изображения при помощи сфокусированных в точки аспектов изображаемой сцены // Опт. и спектр. 1999. Том 86, № 5. С.864-872.

159. Dodgson N., Moore J., Lang S., Martin G, Canepa P. 50 inch time multiplexed autostereoscopic display // Proc. SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII. 2000. Vol. 3957. P.177-183.
160. Pausch R. et al. A practical low cost stereo head mounted display // In Stereoscopic Displays and Applications II Proc. SPIE. 1991. Vol. 1457. P.198-209.
161. Upton H. Goodman J. Eyeglass heads up display // Proc. SID. 1982. Vol.23. P.77-80.
162. Woodard O., Lo J., Khandaker M., Gassel J., Herrmann F., Ong H., Tsaur B.Y., Reese C. A full-color SXGA TN AMLCD for military head-mounted displays and viewer applications // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 6955. 69550B-1-10.
163. Choi H.K., Woodard O., Tsaur B.Y., Dingle B., Yung E., Greiman J., Cheong N., Chern W.-F., Lo J., Anupongongarch P., Khandaker M., Costa D., Herrmann F., Ong H., Manufacturable full-color AMLCDs for military head-mounted displays and viewer applications // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7326. 73260G-1-8.
164. Desjardins D.D., Byrd J.C., Hopper D.G. Military display market: update to fourth comprehensive edition // In Display Technologies & Applications for Defense, Security and Avionic III. 2009. SPIE. Vol.7327. paper 4.
165. Higuchi K., Ishii K., Ishikawa J et al. Experimental holographic movie IV: The projection-type display system using a retro-directive screen // Proc. SPIE, 1995. Vol.2406, P. 20-26.
166. Stanley M, Bannister R.W., Cameron C.D., Coomber S.D., Cresswell I., Hughes J.R., Jackson P., Milham K., Miller R., Payne D.A., Scattergood I.D.C., Smith A., Smith M.A., Watson P., Webber P., Slinger C.W. 100 mega-pixel computer generated holographic images from active tiling(tm) – a dynamic and scalable electro-optic modulator system // Proc. SPIE, Practical HolographyX-VII and Holographic Materials IX. 2003. Vol.5005. P.247-258.
167. Slinger C., Cameron C., Coomber S., Payne D., Smith A., Smith M., Stanley M. // Electroholographic displays for advanced visualization. Presented at the U.S. Display Consortium High Information Content Display Systems Symp. 2003. Arlington,VA.
168. Katsuma H., Sato K. Electronic display system using LCD, laser-diode and holography camera // Proc. SPIE, 1993. Vol.1914. P. 212-218.
169. Maeno K., Fukuya N., Nishikawa O. et al. Electro-holographic display using 15 megapixels LCD // Proc. SPIE, 1996. Vol. 2652. P. 15-23.
170. Hashimoto N., Morokawa S. Motion-picture holography using LC television SLMs // Proc. SID Int. Symp. Orlando, Fl. 1995. Vol.26. P.847-850.
171. Lucente M., Pappu R., Sparell C.J. et al. Progress in holographic video with acoustooptical modulator display // Proc. SPIE. 1995. Vol.2577. P.2-7.
172. Farhoosh H., Fainman Y., Urquhart K. et al. Real-time display of 3-D computer data using computer-generated holograms // Proc. SPIE, 1989. Vol.1052. P.172-176.

173. Son J.Y., Shestak S.A., Lee S.K. et al. Pulsed laser holographic video // Proc. SPIE, 1996. Vol. 2652. P.24-28.
174. Ковалев А.М. Виртуальное пространство в сферической перспективе // Опт. журн., 1999. Том. 66, № 6. С.127-135.
175. Otani T. Brothers Industries develops head-mountable retinal scanning display // Nikkei Electronics Asia Newsletter. 2008. Apr. 11.
176. Smith P. Measuring the electro-optic response of LCD // Electro-optical systems design. 1979. № 4. P.43-47.
177. Kelley E.F. Fundamentals of display metrology // SID short courses S-3. 2002. Boston, Massachusetts. 204 p.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

КАФЕДРА ФИЗИКИ

История развития дисплеев на жидких кристаллах

Разработка плоских дисплейных панелей началась в США в лаборатории авионики в 1969 г., и была во многом связана с развитием физики жидких кристаллов (ЖК). Первый активно-матричный ЖК дисплей был изготовлен в 1972 г., в США. На фирме «Вестингхаус», США в 1972 г. был разработан первый ЖК дисплей с тонкопленочной технологией. С начала 1980-х годов начался массовый выпуск полноцветных дисплеев для мониторов компьютеров. Следующим шагом явилось увеличение углов обзора при сохранении контраста. В 1982 г. была предложено для этого использовать супертвистовую структуру. В начале 1990-х годов цветные супертвистовые дисплеи нашли применение в качестве экранов компактных записных книжек, для персональных компьютеров. К 1992 г. активно-матричные ЖКД превзошли ЭЛТ. В 1998 г. сформировался рынок настольных мониторов для персональных компьютеров (ПК). Актуальными проблемами являются создание быстродействующих дисплеев для многофункциональных ПК, цифрового телевидения и объемных дисплеев.

Томилин Максим Георгиевич,
Невская Галина Егоровна

ДИСПЛЕИ НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Учебное пособие

В авторской редакции
Дизайн М.Г. Томилин, Г.Е. Невская
Верстка М.Г. Томилин, Г.Е. Невская
Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати <дата фактического подписания>
Заказ № <получить в РИО>
Тираж 200 экз.
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

